

Wahrnehmung von Verkehrszeichen und Straßenumfeld bei Nachtfahrten im übergeordneten Straßennetz

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Romy Reinisch
aus Dohna

Referenten: Prof. Dr.-Ing. J. Stefan Bald
Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh

Datum der Einreichung: 27. Oktober 2009
Datum der Prüfung: 19. März 2010

Darmstadt 2010

D17

Gliederung

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung und Methodik	2
2	Stand des Wissens	5
2.1	Der Einfluss der Werbung auf die Verkehrssicherheit	5
2.2	Der Begriff Auffälligkeit	10
3	Beschreibung des Perception-Modells	14
3.1	Allgemeines	14
3.2	Die Modellierungsgrundsätze	14
3.3	Der Prozess des Sehens	15
3.4	Der Prozess des Wahrnehmens	18
3.5	Der Prozess des Erkennens	31
3.6	Das Blickverhalten	32
3.7	Das Basismodell des Perception-Modells	36
4	Beschreibung der Einflussparameter	38
4.1	Allgemeines	38
4.2	Die Untergliederung der fahrerspezifischen Einflüsse	38
4.3	Umwelteinflüsse	39
4.4	Straßenspezifische Einflüsse	47
4.5	Verkehrsspezifische Einflüsse	53
4.6	Fahrerspezifische Einflüsse - Langfristig wirkende Variablen	57
4.7	Fahrerspezifische Einflüsse - Kurzfristig wirkende Variablen	68
4.8	Zusammenfassung	72
5	Die Untersuchungen	76
5.1	Beschreibung des Untersuchungsumfangs	76
5.2	Beschreibung des Lichtlabors	78
5.3	Das Probandenkollektiv	83
5.4	Beschreibung der Untersuchungen	87
5.5	Auswertung des Untersuchungsabschnitts I	93
5.6	Auswertung des Untersuchungsabschnitts II	109

5.7	Auswertung des Blickverhaltens	120
6	Entwicklung eines Modells zur Berechnung der subjektiv empfundenen Komplexität	136
6.1	Allgemeines	136
6.2	Die Lage des Objektes	138
6.3	Die Größe des Objektes	139
6.4	Lichttechnische Auffälligkeit des Objektes	140
6.5	Anzahl aller Objekte	141
6.6	Kognitive Relevanz	142
6.7	Statistische Auswertung der drei Komplexitätsmodelle	143
6.8	Erläuterungen anhand eines Beispiels	146
6.9	Zusammenfassung	148
7	Einsatz und Möglichkeiten des Komplexitätsmodells	150
7.1	Allgemeines	150
7.2	Ermittlung der Grenzwerte	150
7.3	Vorläufige Checkliste für das Genehmigungsverfahren	156
8	Zusammenfassung	159
9	Ausblick	163

Inhaltsverzeichnis

Bildverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Methodik	2
2 Stand des Wissens	5
2.1 Der Einfluss der Werbung auf die Verkehrssicherheit	5
2.1.1 Allgemeines	5
2.1.2 Ältere Untersuchungen	5
2.1.3 Jüngere Untersuchungen	7
2.1.4 Zusammenfassung	10
2.2 Der Begriff Auffälligkeit	10
2.2.1 Definition	10
2.2.2 Untersuchungen	11
3 Beschreibung des Perception-Modells	14
3.1 Allgemeines	14
3.2 Die Modellierungsgrundsätze	14
3.3 Der Prozess des Sehens	15
3.3.1 Überblick	15
3.3.2 Die Sehbereiche	15
3.3.3 Das Gesichtsfeld	16
3.4 Der Prozess des Wahrnehmens	18
3.4.1 Überblick	18
3.4.2 Periphere Wahrnehmungsschwellen	18
3.4.3 Mesopische Wahrnehmungsmodelle	19
3.4.3.1 Einleitung und physiologische Grundlagen	19
3.4.3.2 Helligkeitsmodelle	20
3.4.3.3 Sehleistungsmodelle	25
3.4.3.4 Zusammenfassung	31
3.5 Der Prozess des Erkennens	31
3.5.1 Überblick	31
3.5.2 Die Gestaltfaktoren	32
3.6 Das Blickverhalten	32
3.6.1 Überblick	32
3.6.2 Fixationen und Saccaden	33
3.6.3 Ein Modell des Blickverhaltens	34
3.6.4 Das Fixationsverhalten der Fahrer auf Verkehrszeichen	35

3.7	Das Basismodell des Perception-Modells	36
4	Beschreibung der Einflussparameter	38
4.1	Allgemeines	38
4.2	Die Untergliederung der fahrerspezifischen Einflüsse	38
4.3	Umwelteinflüsse	39
4.3.1	Umfeldhelligkeit	39
4.3.1.1	Allgemeines und Prognosen	39
4.3.1.2	Ergebnisse aus der Literatur	40
4.3.1.3	Zusammenfassung	43
4.3.2	Widrige Sichtverhältnisse	43
4.3.2.1	Allgemeines und Prognosen	43
4.3.2.2	Ergebnisse aus der Literatur	44
4.3.2.3	Zusammenfassung	46
4.4	Straßenspezifische Einflüsse	47
4.4.1	Querschnitt	47
4.4.1.1	Allgemeines und Prognosen	47
4.4.1.2	Ergebnisse aus der Literatur	47
4.4.1.3	Zusammenfassung	48
4.4.2	Lage der Straße (Umfeld)	48
4.4.2.1	Allgemeines und Prognosen	48
4.4.2.2	Ergebnisse aus der Literatur	49
4.4.2.3	Zusammenfassung	50
4.4.3	Linienführung	50
4.4.3.1	Allgemeines und Prognosen	50
4.4.3.2	Ergebnisse aus der Literatur	51
4.4.3.3	Zusammenfassung	52
4.5	Verkehrsspezifische Einflüsse	53
4.5.1	Verkehrsstärke	53
4.5.1.1	Allgemeines und Prognosen	53
4.5.1.2	Ergebnisse aus der Literatur	54
4.5.1.3	Zusammenfassung	54
4.5.2	Gefahrenre Geschwindigkeit	54
4.5.2.1	Allgemeines und Prognosen	54
4.5.2.2	Ergebnisse aus der Literatur	54
4.5.2.3	Zusammenfassung	56
4.6	Fahrerspezifische Einflüsse - Langfristig wirkende Variablen	57
4.6.1	Geschlecht	57
4.6.1.1	Allgemeines und Prognosen	57
4.6.1.2	Ergebnisse aus der Literatur	57
4.6.1.3	Zusammenfassung	58
4.6.2	Alter	58
4.6.2.1	Allgemeines und Prognosen	58
4.6.2.2	Ergebnisse aus der Literatur	59
4.6.2.3	Zusammenfassung	65
4.6.3	Fahrerfahrung	66

4.6.3.1	Allgemeines und Prognosen	66
4.6.3.2	Ergebnisse aus der Literatur	66
4.6.3.3	Zusammenfassung	68
4.7	Fahrerspezifische Einflüsse - Kurzfristig wirkende Variablen	68
4.7.1	Visuelle Beanspruchung/ Belastung	68
4.7.1.1	Allgemeines und Prognosen	68
4.7.1.2	Ergebnisse aus der Literatur	69
4.7.1.3	Zusammenfassung	70
4.7.2	Müdigkeit	71
4.7.2.1	Allgemeines und Prognosen	71
4.7.2.2	Ergebnisse aus der Literatur	71
4.7.2.3	Zusammenfassung	72
4.8	Zusammenfassung	72
5	Die Untersuchungen	76
5.1	Beschreibung des Untersuchungsumfangs	76
5.1.1	Allgemeines	76
5.1.2	Die Straßenszenarien	76
5.2	Beschreibung des Lichtlabors	78
5.2.1	Allgemeines	78
5.2.2	Lichttechnische Überprüfung	79
5.3	Das Probandenkollektiv	83
5.3.1	Allgemeines	83
5.3.2	Die Altersverteilung der Probanden	85
5.3.3	Weitere fahrdemographische Daten	86
5.4	Beschreibung der Untersuchungen	87
5.4.1	Psychophysische Untersuchungen - Untersuchungsabschnitt I	87
5.4.1.1	Allgemeines	87
5.4.1.2	Inhalt der Untersuchungen	87
5.4.1.3	Ablauf der Untersuchung UAI	88
5.4.2	Psychophysische Untersuchungen - Untersuchungsabschnitt II	89
5.4.2.1	Allgemeines	89
5.4.2.2	Inhalt der beiden Aufgaben	89
5.4.2.3	Ablauf der Untersuchung UAI	90
5.4.3	Blickverhaltensuntersuchungen	91
5.4.3.1	Allgemeines	91
5.4.3.2	Aufnahmen im freien Feld	92
5.4.3.3	Aufnahmen im Versuchslabor	93
5.5	Auswertung des Untersuchungsabschnitts I	93
5.5.1	Allgemeines	93
5.5.2	Der Einfluss des tatsächlichen Alters bzw. der Altersgruppe	94
5.5.2.1	Allgemeines	94
5.5.2.2	Statistische Analyse des Parameters <i>tatsächliches Alter des Probanden</i>	94
5.5.2.3	Statistische Analyse des Parameters <i>Altersgruppe</i>	95

5.5.2.4	Diskussion der Ergebnisse	97
5.5.3	Der Einfluss der Kategorie der Szenarien	98
5.5.3.1	Allgemeines	98
5.5.3.2	Statistische Analyse des Parameters <i>Kategorie</i>	99
5.5.3.3	Statistische Analyse des Parameters <i>Kategorie, jede Altersgruppe</i>	101
5.5.3.4	Statistische Analyse des Parameters <i>Altergruppe, für jede Kategorie</i>	103
5.5.3.5	Diskussion der Ergebnisse	106
5.5.4	Zusammenfassung	107
5.6	Auswertung des Untersuchungsabschnitts II	109
5.6.1	Allgemeines	109
5.6.2	Übersicht über die Daten der Haupt- und Nebenaufgabe	109
5.6.2.1	Allgemeines	109
5.6.2.2	Die Hauptaufgabe	110
5.6.2.3	Die Nebenaufgabe	111
5.6.3	Der Einfluss der Komplexität auf die Nebenaufgabe	112
5.6.3.1	Allgemeines	112
5.6.3.2	Altersgruppe jung	113
5.6.3.3	Altersgruppe mittel	115
5.6.3.4	Altersgruppen alt und alt*	117
5.6.4	Zusammenfassung	119
5.7	Auswertung des Blickverhaltens	120
5.7.1	Allgemeines	120
5.7.2	Vergleich zwischen freiem Feld und Lichtlabor	120
5.7.2.1	Allgemeines	120
5.7.2.2	Anzahl aller Fixationen	121
5.7.2.3	Anzahl der Fixationen getrennt nach Fixationszielen	121
5.7.2.4	Fixationszeiten getrennt nach Fixationszielen	123
5.7.2.5	Gegenüberstellung der Ergebnisse	125
5.7.2.6	Aussagen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse	126
5.7.3	Der Einfluss des Alters	127
5.7.3.1	Allgemeines	127
5.7.3.2	Anzahl aller Fixationen	127
5.7.3.3	Anzahl der Fixationen getrennt nach Fixationszielen	128
5.7.3.4	Fixationszeiten getrennt nach Fixationszielen	129
5.7.4	Der Einfluss der Komplexität der Szenarien	130
5.7.4.1	Allgemeines	130
5.7.4.2	Anzahl aller Fixationen	130
5.7.4.3	Anzahl der Fixationen getrennt nach Fixationszielen	131
5.7.4.4	Fixationszeiten getrennt nach Fixationszielen	133
5.7.5	Zusammenfassung	134
6	Entwicklung eines Modells zur Berechnung der subjektiv empfundenen Komplexität	136
6.1	Allgemeines	136
6.2	Die Lage des Objektes	138

6.3	Die Größe des Objektes	139
6.4	Lichttechnische Auffälligkeit des Objektes	140
6.5	Anzahl aller Objekte	141
6.6	Kognitive Relevanz	142
6.7	Statistische Auswertung der drei Komplexitätsmodelle	143
6.8	Erläuterungen anhand eines Beispiels	146
6.9	Zusammenfassung	148
7	Einsatz und Möglichkeiten des Komplexitätsmodells	150
7.1	Allgemeines	150
7.2	Ermittlung der Grenzwerte	150
7.2.1	Grundlagen	150
7.2.2	Grenzwert des Ranges relevanter Objekte	151
7.2.3	Grenzwert des Differenzbetrags b_{EO}	153
7.2.4	Grenzwert des „Rauschens“	155
7.2.5	Zusammenfassung	155
7.3	Vorläufige Checkliste für das Genehmigungsverfahren	156
8	Zusammenfassung	159
9	Ausblick	163
10	Literaturverzeichnis	165
11	Formelzeichen, Abkürzungen	175
11.1	Allgemeine Formelzeichen	175
11.2	Eingeführte Formelzeichen	176
11.3	Abkürzungen	176

Anhang

Bildverzeichnis

Bild 2-1:	Die Auffälligkeit (A) eines Objektes in Abhängigkeit vom Kontrast (K) und der Umfeldleuchtdichte LU bei konstantem ΔLO [Getzberger, 1976]	13
Bild 3-1:	Darstellung der Gesichtsfeldbereiche [Schweigert, 2003], [Pannasch, 2003]	17
Bild 3-2:	Basismodell der Helligkeitswahrnehmung [Sagawa, 2006]	21
Bild 3-3:	Modelle für verschiedene Möglichkeiten des Einflusses der chromatischen Signale auf die Helligkeit im mesopischen Bereich [Sagawa, 2006]	24
Bild 3-4:	Vorgeschlagenes ergänzendes Modell der Photometrie [Sagawa, 2006]	25
Bild 3-5:	Durchschnittliche spektrale Empfindlichkeit von fünf Probanden für ein 2°-Objekt bei peripherer Wahrnehmung (10°) für unterschiedlichen Hintergrundleuchtdichten [Freiding et al., 2007]	26
Bild 3-6:	Durchschnittliche Kontrastschwelle von fünf Probanden bei peripherer Wahrnehmung (10°) für unterschiedliche Objekt-Farben bei unterschiedlichen Hintergrundleuchtdichten Freiding et al., 2007]	27
Bild 3-7:	Spektrale Empfindlichkeitskurve von fünf Probanden für ein 2°-Objekt bei peripherer Wahrnehmung (10°) für die Hintergrundleuchtdichten von 1 cd/m ² (links) und 0,3 cd/m ² (rechts) [Walkey et al., 2007]	27
Bild 3-8:	Durchschnittliche spektrale Empfindlichkeit von zehn Probanden für einen 2°-Landolt-Ring und peripherer Wahrnehmung bei unterschiedlichen Hintergrundleuchtdichten [Várady et al., 2007]	28
Bild 3-9:	Ein Modell zur Beschreibung des Blickverhaltens (Gengenbach, 1999 in [Schweigert, 2003])	35
Bild 3-10:	Basismodell des Perception-Modells	37
Bild 4-1:	Schematische Darstellung des Abblendlichtes in Kurven und Geraden [Kuhl, 2006]	40
Bild 4-2:	Darstellung der Fixationsbereiche auf geraden Landstraßenab- schnitten bei Tag (links) und Dunkelheit (rechts) [Diem, 2004]	42
Bild 4-3:	Darstellung der Fixationsbereiche auf einbahnigen (links) und zweibahnigen (rechts) Querschnitten bei Tag im Außerortsbereich [Diem, 2004]	48
Bild 4-4:	Darstellung der Fixationsbereiche auf einer Stadtstraße (links) und einem geraden Landstraßenabschnitt (rechts) bei Tag [Diem, 2004]	49
Bild 4-5:	Schematische Darstellung der primären Suchzone nach visueller Information in einer unübersichtlichen Rechts- und Linkskurve [Cohen, 1985]	52
Bild 4-6:	Blickpunkte und Blickwinkel in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit („Traffic Engineering Handbook“, o. J. in [HAV, 2002])	55
Bild 4-7:	Abhängigkeit des Sehfeldes von der gefahrenen Geschwindigkeit [Bagl et al., 1999]	56

Bild 4-8:	Anteil der Personen mit Sehfehler in Abhängigkeit vom Alter [Cohen, 1986]	60
Bild 4-9:	Veränderung der Sehschärfe über das Alter für Tag (gestrichelte Linie) [Methling und Peschke, 1987] und Dämmerung (durchgezogene Linie) [Lachenmayr et al., 1996]	61
Bild 4-10:	Zumutbare Leuchtdichte in Abhängigkeit vom Alter [Gramberg-Danielsen et al., 1984]	62
Bild 4-11:	Veränderung der Pupillenweite in Abhängigkeit vom Alter für Tag (gestrichelte Linie) und Dunkelheit (durchgezogene Linie) (nach Trendelenburg, 1961 in [Gramberg-Danielsen et al., 1984])	63
Bild 4-12:	Altersabhängigkeit des Apperzeptionsvermögens (nach Cohen, 1995 in [Bagl et al., 1999])	64
Bild 4-13:	Zeitliche Größe des Kurzspeichers in Abhängigkeit vom Alter (nach Riedel, 1981 in [Knoflacher, 1987])	65
Bild 4-14:	Das Perception-Modell und die Einflüsse aus den verschiedenen Kategorien sowie Darstellung eines vereinfachten Komplexitätsmodells	73
Bild 5-1:	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus im Labor	79
Bild 5-2:	Gestelltes Szenario auf dem Griesheimer Flugplatz	80
Bild 5-3:	Gegenüberstellung der mittlere Leuchtdichten der Verkehrszeichen in der Realität und im Labor für den Golf V (H7)	81
Bild 5-4:	Gegenüberstellung der mittlere Leuchtdichten der Umfeld der Verkehrszeichen in der Realität und im Labor für den Golf V (H7)	81
Bild 5-5:	Gegenüberstellung der Kontraste in der Realität und im Labor für den Golf V (H7)	82
Bild 5-6:	Altersverteilung der Führerscheininhaber für das Jahr 2004 und als Prognose für das Jahr 2050 [Statistisches Bundesamt, 2006]	84
Bild 5-7:	Präsentation der Hauptaufgabe (oben) und der Nebenaufgabe (unten) im Untersuchungsabschnitt II	90
Bild 5-8:	Blickbeobachtungssystem im Einsatz	92
Bild 5-9:	Median, Minimum und Maximum aller Altersstufen	94
Bild 5-10:	Individuelle Mediane der subjektiv empfundene Komplexität für jeden Probanden – gruppiert nach Altersgruppe	95
Bild 5-11:	Mediane, Minima und Maxima der drei Altersgruppen	96
Bild 5-12:	Median, Minimum und Maximum für die drei Ausprägungen des Anteil der Nachtfahrten innerhalb der letzten 12 Monaten	99
Bild 5-13:	Median, Minimum und Maximum für die vier Kategorien getrennt nach den drei Altersgruppen	102
Bild 5-14:	Median, Minimum und Maximum für die drei Altersgruppen getrennt nach den vier Kategorien	104
Bild 5-15:	Lösung der Hauptaufgabe der drei Altersgruppen	111
Bild 5-16:	Lösung der Nebenaufgabe der drei Altersgruppen	112
Bild 5-17:	Lösung der Nebenaufgabe für jeden Probanden der Altersgruppe jung	113
Bild 5-18:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 2, Durchgang 3	114
Bild 5-19:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 2, Durchgang 3	115

Bild 5-20:	Lösung der Nebenaufgabe für jeden Probanden der Altersgruppe mittel	116
Bild 5-21:	Lösung der Nebenaufgabe für jeden Probanden der Altersgruppen alt und alt*	118
Bild 5-22:	Mittlere Anzahl aller Fixationen im Lichtlabor und im freien Feld	121
Bild 5-23:	Mittlere Anzahl der Fixationen auf verschiedene Fixationsziele im freien Feld – Vergleich zwischen den Probanden	122
Bild 5-24:	Mittlere Anzahl der Fixationen auf verschiedene Fixationsziele im Lichtlabor – Vergleich zwischen den Probanden	122
Bild 5-25:	Subjektives Verhältnis der Anzahl der Fixationen zwischen Lichtlabor und freiem Feld (Bezugsdaten)	123
Bild 5-26:	Mittlere Fixationszeiten der verschiedenen Fixationsziele im freien Feld – Vergleich zwischen den Probanden	124
Bild 5-27:	Mittlere Fixationszeiten der verschiedenen Fixationsziele im Lichtlabor – Vergleich zwischen den Probanden	125
Bild 5-28:	Subjektives Verhältnis der mittleren Fixationszeiten der verschiedenen Fixationsziele zwischen Lichtlabor und freiem Feld (Bezugsdaten)	125
Bild 5-29:	Mittlere Anzahl aller Fixationen – Vergleich zwischen den Altersgruppen	128
Bild 5-30:	Mittlere Anzahl der Fixationen auf ausgewählte Fixationsziele – Vergleich zwischen den Altersgruppen jung und alt	128
Bild 5-31:	Mittlere Fixationszeiten der verschiedenen Fixationsziele – Vergleich zwischen den Altersgruppen jung und alt	130
Bild 5-32:	Mittlere Anzahl aller Fixationen der drei Altersgruppen getrennt nach den drei Komplexitätsbereichen	131
Bild 5-33:	Mittlere Anzahl der Fixationen auf ausgewählte Fixationsziele eines Probanden der Altersgruppe alt – getrennt nach den drei Komplexitätsbereichen	132
Bild 5-34:	Mittlere Fixationszeiten der ausgewählten Fixationsziele eines Probanden der Altersgruppe alt – getrennt nach den drei Komplexitätsbereichen	134
Bild 6-1:	Modell zur Berechnung der Komplexität	137
Bild 6-2:	Relevanz eines Objektes in Abhängigkeit vom horizontalen Abstand	138
Bild 6-3:	Relevanz eines Objektes in Abhängigkeit vom vertikalen Abstand	139
Bild 6-4:	Auffälligkeit in Abhängigkeit von der Größe eines Objektes für $LU = 0,085 \text{ cd/m}^2$ [Getzberger, 1976] und daraus resultierende Relevanz für die Komplexität	140
Bild 6-5:	Darstellung des Zusammenhangs zwischen dem gemessenen Leuchtdichte-verhältnis Y/Y_n und CIELAB L^*	141
Bild 6-6:	Einfluss der Objektanzahl auf die Relevanz für die Komplexität für jede Altersgruppe	142
Bild 6-7:	Darstellung des Zusammenhangs zwischen K_X und K_{SE} und der Regressionsgeraden des Modells der Altersgruppe alt	144
Bild 6-8:	Beispielszenario zur Erläuterung des Komplexitätsmodells	147

Bild 7-1:	Darstellung des Zusammenhangs zwischen K_X und K_{SE} für die Altersgruppe alt und deren Einsatzbereiche	151
Bild 7-2:	Vorläufige Checkliste zum Prüfvorgang im Genehmigungsverfahren	158

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Ausdehnungen des monokulären Gesichtsfeldes (rechtes Auge) für verschiedene Wellenlängen im mesopischen Bereich 1[Methling und Peschke 1987]; 2(Woodson und Conover, 1964 in [Färber et al., 2007])	17
Tabelle 4.1:	Lage der Fixationsbereiche in Abhängigkeit von Umfeldhelligkeit und Linienführung auf Landstraßen [Diem, 2004]	41
Tabelle 4.2:	Lage der Fixationsbereiche am Tag für Außerorts [Diem, 2004] und innerorts [Cohen, 1985], [Cohen, 1986]	53
Tabelle 4.3:	Prognostizierte Entwicklung der Bevölkerungsverteilung nach Alter in Deutschland bis zum Jahr 2050 [Statistisches Bundesamt, 2008]	58
Tabelle 4.4:	Psychophysische Einschränkungen älterer Menschen [Fastenmeier et al., 2005]	59
Tabelle 4.5:	Sehbeeinträchtigungen und die daraus folgenden Probleme [Goldstein, 2002]	60
Tabelle 4.6:	Während der Akkomodation von 20 m auf 0,5 m Entfernung zurückgelegte Wege	63
Tabelle 5.1:	Beschreibung der einzelnen Kategorien der Straßenraumszenarien	77
Tabelle 5.2:	Legende zu Bild 5.1	79
Tabelle 5.3:	Der Nachweis der Wahrnehmbarkeit der Verkehrszeichen für den Golf V (H7)	83
Tabelle 5.4:	Altersverteilung der Probanden in den Untersuchungsabschnitten I und II	85
Tabelle 5.5:	Altersverteilung der Probanden für die Blickbeobachtungsuntersuchungen	86
Tabelle 5.6:	Übersicht über die Kilometerleistung der letzten zwölf Monate und dem Anteil der Nachtfahrten	86
Tabelle 5.7:	Fünfstufige Bewertungsskala zur Einstufung der Komplexität des Straßenszenarios	87
Tabelle 5.8:	Übersicht über die Anzahl der gezeigten Straßenszenarien in Abhängigkeit der Anzahl nicht-relevanter Objekte	88
Tabelle 5.9:	Zeitplan des Untersuchungsabschnittes I	88
Tabelle 5.10:	Zeitplan des Untersuchungsabschnittes II	91
Tabelle 5.11:	Ergebnis des Signifikanztests der Gleichheit der Mediane je Altersgruppe	97
Tabelle 5.12:	Ergebnisse der paarweisen Vergleiche zwischen den ermittelten Medianen je Altersgruppe	97
Tabelle 5.13:	Ergebnis des Signifikanztests der Gleichheit der Mediane je Altersgruppe	100
Tabelle 5.14:	Ergebnisse der paarweisen Vergleiche zwischen den Kategorien der Szenarien	101
Tabelle 5.15:	Ergebnisse der Signifikanztests der Gleichheit der Mediane je Kategorie für jede Altersgruppe	102
Tabelle 5.16:	Ergebnisse der paarweisen Vergleiche zwischen den Kategorien der Szenarien für die Altersgruppe jung	103

Tabelle 5.17: Ergebnisse der Signifikanztests der Gleichheit der Mediane je Altersgruppe für jede Kategorie	105
Tabelle 5.18: Ergebnisse der paarweisen Vergleiche zwischen den Altersgruppen jung und mittel sowie jung und alt für jede Kategorie	106
Tabelle 5.19: Definition der drei Komplexitätsbereiche	114
Tabelle 5.20: Häufigkeitsverteilung der Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe in Abhängigkeit der Komplexität des Szenarios i für die Probanden der Altersgruppe mittel	116
Tabelle 5.21: Häufigkeitsverteilung der Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe in Abhängigkeit der Komplexität des Szenarios i-1 für die Probanden der Altersgruppe mittel	117
Tabelle 5.22: Häufigkeitsverteilung der Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe in Abhängigkeit der Komplexität des Szenarios i für die Probanden der Altersgruppen alt und alt*	118
Tabelle 5.23: Häufigkeitsverteilung der Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe in Abhängigkeit der Komplexität des Szenarios i-1 für die Probanden der Altersgruppen alt und alt*	119
Tabelle 6.1: Mathematischen Zusammenhänge der einzelnen Modellparameter	137
Tabelle 6.2: Kognitive Relevanz für verschiedene Objekte in Abhängigkeit von der Altersgruppe	143
Tabelle 6.3: Einstufung des Korrelationskoeffizienten nach der allgemeinen Statistik [Zöfel, 2002] und nach Cohen (1988) (in [Sedlmeier und Renkewitz, 2008])	145
Tabelle 6.4: Ergebnis der Korrelationsanalyse zwischen K_X und K_{SE} der Komplexitätsmodelle je Altersgruppe	145
Tabelle 6.5: Ergebnis der lineare Regressionsanalyse der Komplexitätsmodelle je Altersgruppe	146
Tabelle 6.6: Ergebnis der Absicherung des Regressionskoeffizienten gegen Null für die Komplexitätsmodelle je Altersgruppe	146
Tabelle 6.7: Bestimmung des Objektparameters PF_{xy} für die Objekte des Beispielszenarios	147
Tabelle 6.8: Bestimmung der Objektparameter GF und AF für die Objekte des Beispielszenarios	148
Tabelle 6.9: Bestimmung der Objekteigenschaften EO, der Objektkomplexitäten OK und der Komplexität des Szenarios K_X , Altersgruppe alt	148
Tabelle 7.1: Der Größe nach geordnete Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte für drei Beispielszenarien	153
Tabelle 7.2: Differenzbeträge b_{EO} für die betrachteten Szenarien 79 und 87	154

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

Das für die Aufnahme von Informationen wichtigste Sinnesorgan der Menschen sind die Augen. Allgemein nimmt der Mensch etwa 70% aller Informationen aus der Umwelt über das visuelle System auf. [WELSCH und LIEBMANN, 2004] Im Bereich des Straßenverkehrs werden sogar über 90% aller Informationen über die Augen aufgenommen. (JAINSKI (1985) in [KIEGELAND, 1996], [COHEN, 1986], [FRANK, 2003])

Im Straßenraum befindet sich eine Vielzahl visueller Informationen, die alle auf den Fahrer einströmen. Dazu gehören neben den relevanten Informationen, wie beispielsweise den Verkehrszeichen, auch nicht-relevante Informationen, wie beispielsweise Werbetafeln. Dabei ist die Kapazität der Informationsaufnahme und -verarbeitung begrenzt. Insbesondere die älteren Fahrer haben aufgrund psychophysischer Veränderungen offensichtlich Probleme, die relevanten Informationen aus der Vielzahl der Informationen herauszufiltern. Um sich im Straßenraum jedoch richtig orientieren und entsprechend verhalten zu können, muss der Fahrer insbesondere die relevanten Informationen aufnehmen und verarbeiten sowie in entsprechende Handlungsmuster umsetzen.

Bei nächtlichen Fahrten auf Bundesautobahnen wurde deutlich, dass sich das Straßenumfeld hinsichtlich des visuellen Informationsgehaltes ständig verändert. Zum Einen gibt es Szenarien, in denen sehr wenige visuelle Informationen vorhanden sind, zum Anderen existieren Szenarien, in denen eine Vielzahl an Informationen vorliegen, die neben den für den Fahrer relevanten Informationen auch nicht-relevante Informationen enthalten. Auch wenn die nicht-relevanten Informationen in den vorgeschriebenen Abständen vom Straßenrand aufgestellt sind, können diese vom Fahrer aufgrund ihrer Größe und ihrer lichttechnischen Eigenschaften gesehen und wahrgenommen werden.

Beim Prozess der visuellen Informationsaufnahme und -verarbeitung durchläuft ein Objekt die aufeinander aufbauenden Stufen: Sehen – Wahrnehmen – Erkennen. Dabei gilt: Nur das was gesehen wird, kann auch wahrgenommen werden, und nur das was wahrgenommen wird, kann auch erkannt bzw. gelesen werden. Alle Objekte eines Szenarios werden zunächst auf der Netzhaut abgebildet. Bei ausreichender Auffälligkeit eines Objektes im peripheren Bereich, wird dieses zunächst wahrgenommen und danach über reflektorische Blickbewegungen in den fovealen Bereich „gerückt“, wo es dann erkannt bzw. gelesen werden kann.

Die Auffälligkeit eines Objektes ist zum Einen abhängig von seinen Eigenschaften, wie Größe, Farbe, Form, Leuchtdichte usw., zum Anderen aber auch vom Umfeld, in dem es sich befindet. Demnach kann ein Objekt, welches in einem eher eintönigen Umfeld sehr auffällig ist, in einem sehr komplexen Umfeld eher unauffällig erscheinen. Nach GETZBERGER (1976) ist das „Objekt auffälliger, das die größte Chance besitzt, identifiziert zu werden.“ Unter Komplexität des Umfeldes wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die „subjektiv empfundene Komplexität im Hinblick auf die Wahrnehmbarkeit von Verkehrszeichen“ verstanden. Es wird vermutet, dass mit zunehmender Anzahl an visuellen Informationen die subjektiv

empfundene Komplexität des Umfeldes steigt und somit die Wahrnehmbarkeit von relevanten Informationen beeinflusst wird.

Insbesondere bei Dunkelheit wird das Problem der Auffälligkeit zwischen den für den Fahrer relevanten Informationen und den nicht-relevanten Informationen deutlich. In der vorliegenden Arbeit werden unter den relevanten Informationen die Verkehrsschilder verstanden, Fahrbahnmarkierungen werden nicht betrachtet. Die relevanten Informationen sind retroreflektierend ausgeführt. Das bedeutet, dass die Informationen bei Dunkelheit erst infolge Anstrahlung durch die fahrzeugeigenen Scheinwerfer sichtbar werden. Im Gegensatz dazu wird der überwiegende Teil der nicht-relevanten Informationen als selbstleuchtend ausgeführt, wodurch oft hohe Leuchtdichten erzeugt werden können. Daher und auch aufgrund ihrer Größe sind diese Informationen bereits aus großer Entfernung und auch außerhalb der Reichweite der fahrzeugeigenen Scheinwerfer sichtbar. Es wird vermutet, dass zwischen den Verkehrszeichen¹ und den Objekten des Straßenumfeldes eine Konkurrenz hinsichtlich der Auffälligkeit besteht. Die relevanten Informationen werden aufgrund der nicht-relevanten Informationen möglicherweise zu spät oder nicht wahrgenommen. Die Folge ist ein Verlust wichtiger Informationen, wodurch beispielsweise die Orientierung des Fahrers eingeschränkt wird. Das daraus resultierende Verhalten des Fahrers kann sich negativ auf die Verkehrssicherheit auswirken.

1.2 Zielsetzung und Methodik

Im Rahmen dieser Arbeit ist der Einfluss des Straßenumfeldes auf die subjektiv empfundene Komplexität zu erarbeiten. Darauf aufbauend ist zu untersuchen, ob und wie sich die subjektiv empfundene Komplexität auf die Wahrnehmung von Verkehrszeichen auswirkt. Aufgrund der Unterschiede zwischen jüngeren und älteren Fahrern, insbesondere im Hinblick auf die psychophysischen Merkmale, wird das Alter des Fahrers als maßgeblicher Einflussparameter betrachtet. Die Ergebnisse der Untersuchungen der vorliegenden Arbeit, insbesondere das Komplexitätsmodell, stellen einen Beitrag zur Berücksichtigung der altersbedingt veränderten Anforderungen an die Gestaltung des Straßenraums dar.

Vorangestelltes Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Komplexitätsmodells zur rechnerischen Bestimmung der subjektiv empfundenen Komplexität. Anhand des Modells und aus den Erfahrungen über den Einfluss der Komplexität auf die Wahrnehmung von Verkehrszeichen werden erste Hinweise, in Form einer Checkliste, für die Verkehrsbehörden erarbeitet. Diese Checkliste kann bei der Genehmigung nicht-relevanter Informationen eingesetzt werden und somit zur Erhöhung der Verkehrssicherheit beitragen.

Zunächst wird in Kapitel 2 ein Überblick über den Stand des Wissens hinsichtlich des Einflusses von Werbung auf die Verkehrssicherheit gegeben. Außerdem wird der Begriff Auffälligkeit definiert sowie die wichtigsten Untersuchungen dazu vorgestellt.

Im Anschluss daran wird in Kapitel 3 ein einfaches Wahrnehmungsmodell erarbeitet, welches die drei Stufen der Wahrnehmung (Sehen, Wahrnehmen und Erkennen)

¹ Unter dem Begriff *Verkehrszeichen* werden im Rahmen dieser Arbeit Verkehrsschilder verstanden.

sowie das Blickverhalten enthält, gegliedert in gesteuertes (zur Orientierung) und getriggertes (reflektorisch) Blickverhalten. Die Stufe des Erkennens wird im Rahmen dieser Arbeit nicht ausführlich behandelt. Da der nächtliche Straßenverkehr im mesopischen Adaptationszustand stattfindet und dieser aufgrund der Beteiligung beider Rezeptortypen sehr komplex ist, werden in diesem Kapitel zudem verschiedene mesopische Wahrnehmungsmodelle vorgestellt.

In Kapitel 4 werden die auf das einfache Wahrnehmungsmodell einwirkenden Einflusskategorien bzw. deren Parameter anhand der Kenntnisse aus einer umfassenden Literaturrecherche beschrieben. Zu den relevanten Kategorien zählen die Umwelteinflüsse sowie Straßenspezifische, Verkehrsspezifische und Fahrerspezifische Einflüsse. Einflüsse, die vom Fahrer selbst hervorgerufen werden, wie beispielsweise Veränderungen infolge Alkohol-, Drogen- oder Medikamentenkonsum werden im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt.

Der Untersuchungsumfang, die Einrichtung des Lichtlabors, das Probandenkollektiv, die durchgeführten Untersuchungen und deren Ergebnisse werden in Kapitel 5 beschrieben. Da im realen Straßenverkehr eine Vielzahl von Faktoren den Fahrer beeinflussen und diese Faktoren auch gegenseitige Wechselwirkungen aufweisen, werden die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit in einem eigens dafür eingerichteten Lichtlabor durchgeführt. Zudem wird der Untersuchungsumfang auf Bundesautobahnen begrenzt. Neben der Einrichtung des Lichtlabors werden weitere lichttechnische Untersuchungen vorgestellt, die die Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf die Realität hinsichtlich der Wahrnehmbarkeit der im Szenario enthaltenen Informationen nachweisen. Zur Bestimmung der Randbedingungen des Probandenkollektivs, wird zunächst auf die demographische Entwicklung in Deutschland bis zum Jahr 2050 und die daraus resultierenden Veränderungen für den Straßenverkehr eingegangen. Im Anschluss daran wird das Probandenkollektiv beschrieben. Nach der Vorstellung der Inhalte und der Abläufe der Untersuchungen, werden die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen beschrieben und diskutiert.

Aus den Ergebnissen des ersten Untersuchungsabschnitts wird in Kapitel 6 ein Basismodell zur Berechnung der subjektiv empfundenen Komplexität entwickelt. Aufgrund des maßgeblichen Einflusses des Alters werden insgesamt drei Komplexitätsmodelle erarbeitet, basierend auf den Daten von insgesamt 13 Szenarien. Die mathematischen Zusammenhänge und alle einwirkenden Objektparameter, die teilweise derzeit noch auf Annahmen beruhen, werden beschrieben. Die erarbeiteten Komplexitätsmodelle dienen als Grundlage für die Entwicklung weiterer Modelle, die auf Untersuchungen im realen Straßenraum basieren.

In Kapitel 7 wird eine Checkliste zur Prüfung der Genehmigung nicht-relevanter Informationen erarbeitet, die ein Beispiel für ein adäquates Mittel im Genehmigungsverfahren nicht-relevanter Informationen darstellt. Die Grenzwerte der Checkliste basieren zum Einen auf den Daten von insgesamt 17 Szenarien des Untersuchungsabschnitts I, also auf Ergebnissen, die im Lichtlabor erzielt wurden. Zum Anderen wurden die mathematischen Zusammenhänge des Basismodells zur Berechnung der Objekteigenschaften eingesetzt, die derzeit teilweise noch auf Annahmen beruhen. Daher kann die erarbeitete Checkliste derzeit nur begrenzt eingesetzt werden und

dient als Grundlage für die Entwicklung einer erweiterten Checkliste, basierend auf Untersuchungen im realen Straßenraum.

In Kapitel 9 werden anhand der Erkenntnisse aus der Literaturstudie, den Untersuchungen und der Entwicklung der Komplexitätsmodelle wichtige Forschungsthemen aufgezeigt. Dabei wird zum Einen auf den Ablauf weiterer Untersuchungen, insbesondere zur subjektiv empfundenen Komplexität im realen Straßenraum eingegangen. Zum Anderen werden basierend auf den statistischen Grundlagen Hinweise für die Dimensionierung des Probandenkollektivs gegeben.

Im Anhang sind weiterführende Erläuterungen zum menschlichen Auge, zum Aufbau der Hirnareale und zur Verarbeitung der Signale einschließlich der Erklärungsansätze der Objektwahrnehmung beschrieben. Des Weiteren sind das ausführliche Perception-Modell, Berechnungen zum Lichtlabor, Angaben zum Probandenkollektiv, Daten für die statistischen Auswertungen des Untersuchungsabschnitts I sowie Auswertungen des Untersuchungsabschnitts II, Daten für die statistischen Auswertungen der drei Komplexitätsmodelle und Daten zur Grenzwertermittlung der vorläufigen Checkliste zusammengefasst.

2 Stand des Wissens

2.1 Der Einfluss der Werbung auf die Verkehrssicherheit

2.1.1 Allgemeines

In den folgenden zwei Kapiteln wird der bisherige Kenntnisstand zum Einfluss der Werbung auf die Wahrnehmung von relevanten Informationen und somit auf die Verkehrssicherheit zusammengefasst. Zunächst werden ältere Untersuchungen vorgestellt, im Anschluss daran werden die Ergebnisse aus den 1990er und 2000er Jahren beschrieben.

2.1.2 Ältere Untersuchungen

In verschiedenen kleineren statistischen Studien wurde der Zusammenhang zwischen der Unfallrate und dem Straßenumfeld untersucht. CHAMPION (1971) (in [WALLACE, 2003]) analysierte den Einfluss von Werbetafeln auf die Unfallrate und konnte keinen Zusammenhang nachweisen. Auch nach MCMONAGLE (1952) (in [WALLACE, 2003]) ist es unwahrscheinlich, dass Werbetafeln und andere irrelevante Objekte direkt mit dem Anstieg der Unfallrate in Verbindung stehen. Allerdings fanden RUSCH (1951), STAFFELD (1953), HEAD (1959), VERSACE (1960) und HOLOHAN (1979) (alle in [WALLACE, 2003]) heraus, dass in Bereichen mit vielen visuellen Informationen (Werbetafeln) der Fahrer abgelenkt wird und die relevanten Informationen übersieht. Demnach ist die Zahl der Unfälle in diesen Bereichen höher. Aufgrund der geringen Anzahl an Daten, der fehlenden Beweise und der Tatsache, dass es sich um Korrelationsstudien handelt, sind diese Ergebnisse allerdings wenig aussagekräftig.

In den Jahren 1961 und 1962 untersuchte die Madigan-Hyland Inc. die Wirkung von Werbetafeln in New York. Dazu wurden Unfalldaten der zuständigen Polizeibehörde ausgewertet, wobei nur die Unfälle berücksichtigt wurden, bei denen die Polizisten „Unaufmerksamkeit des Fahrers“ vermerkt hatten. Die Unfälle wurden in zwei Gruppen untergliedert: Werbetafel gesehen und Werbetafel nicht gesehen. Sie fanden heraus, dass in Bereichen mit viel Werbung mehr als dreimal so viele Unfälle pro Meile auftreten als in Bereichen mit weniger Werbung. Des Weiteren wurde die Verkehrsstärke einbezogen, wobei diese in drei Gruppen (niedrig, mittel, hoch) gegliedert wurde. In allen drei Gruppen hatten die Bereiche mit viel Werbung höhere Unfallraten. Die Ergebnisse dieser Studie sind jedoch wenig aussagekräftig, da zum Einen nicht der gesamte Unfalldatenpool in die Bewertung einbezogen wurde und zum Anderen der Annahme der Polizisten „Unaufmerksamkeit des Fahrers“ ein zu großes Maß zugeordnet wurde. Diese Studie wurde nie veröffentlicht. [WALLACE, 2003]

BLANCHE (1965) (in [WALLACE, 2003]) untersuchte den Zusammenhang zwischen verschiedenen straßenseitigen Objekten (Brücken, Überführungen, Verkehrszeichen aller Art und auch Werbetafeln im Abstand von rund 400 Metern) und der Unfallrate auf der New Jersey Garden State Parkway. Die Unfälle wurden über einen Zeitraum von drei Jahren untersucht. Die Untersuchungsstrecke ist eine 173 Meilen lange, mehrspurige Autobahn mit einer geringen Anzahl von Verkehrstoten, einer sehr

hohen Verkehrsstärke und einer extrem hohen Anzahl straßenseitiger Objekte. Es konnte jedoch keinen Zusammenhang nachgewiesen werden.

ADY (1967) (in [WALLACE, 2003]) analysierte in einer vorher-nachher-Untersuchung den Einfluss von Werbetafeln auf die Unfallrate. Untersucht wurden neun Werbetafeln einer bestimmten Größe, die zudem beleuchtet und informationsreich (z.B. Wettervorhersage, Nachrichten) waren. Die statistische Analyse beinhaltete die monatliche Prüfung der Unfälle für jeweils ein Jahr vor sowie nach Aufstellen der Werbetafel. Dieser Zweijahresabschnitt wurde gewählt, um den Hawthorneffekt (im Laufe der Zeit nimmt die Attraktivität aufgrund der Bekanntheit ab) zu berücksichtigen. Für sechs der neun Werbetafeln konnte aufgrund fehlender Unfalldaten keine ausreichende Analyse durchgeführt werden. Bei zwei Werbetafeln war keine Änderung der Unfallrate zu verzeichnen. Bei einer Werbetafel, einer sehr auffällig beleuchteten und in einer scharfen Kurve aufgebauten, konnte allerdings ein Zusammenhang gefunden werden. Es wurde daraus geschlossen, dass Werbetafeln nicht unbedingt eine Ablenkung vom Verkehrsgeschehen darstellen. Werden sie jedoch in bestimmten Verkehrssituationen aufgestellt, können sie eine ablenkende Wirkung erzeugen und somit die Unfallrate erhöhen. Aufgrund der geringen Datenbasis (drei Werbetafeln) können allerdings keine allgemeinen Aussagen getroffen werden. Des Weiteren wurden in der Untersuchung nur die tödlichen Unfälle berücksichtigt, interessant wären allerdings auch die Beinaheunfälle (Fahrfehler) bzw. die Unfälle ohne Todesfolge.

Neben den statistischen Studien fanden auch verschiedene experimentelle Untersuchungen statt. JOHNSTON und COLE (1976) (in [WALLACE, 2003]) veröffentlichten die Ergebnisse einer Untersuchung, die die Ablenkung irrelevanter Informationen von der Fahraufgabe nachwies. Dazu wurden Probanden (junge Psychologiestudenten) vor einen weißen Bildschirm gesetzt, mit der Aufgabe, einen Joystick in die Richtung zu bewegen, in die plötzlich auftauchende Pfeile zeigten. Außerdem mussten die Probanden beim Auftauchen eines bestimmten Zeichens, dieses durch Drücken eines Knopfes bestätigen. Parallel dazu wurden den Probanden farbige Werbeinhalte präsentiert. Sie fanden heraus, dass in einem „langweiligen“ Experiment infolge von farbigen Werbeinhalten die Aufmerksamkeit der Probanden für die eigentliche Aufgabe anstieg und diese somit besser gelöst werden konnte. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind jedoch nicht sehr aussagekräftig, da auf der einen Seite die Probanden nur einen kleinen Teil des Fahrerpools repräsentieren und auf der anderen Seite die ermittelten Unterschiede sehr gering sind. Des Weiteren fehlen Aussagen darüber, ob und wie die im Labor gewonnenen Erkenntnisse auf die Realität übertragen werden können.

Eine weitere experimentelle Studie ist die Untersuchung von HOLOHAN (1978) (in [WALLACE, 2003]). In dieser Untersuchung wurden den Probanden (Psychologiestudenten) über ein Display Dias für 1,5 Sekunden präsentiert. Inhalt dieser Dias waren verschiedene Zeichen, die in Anzahl, Farbe und Größe variierten. Jedem Probanden wurden 106 Dias gezeigt, in einigen wurde ein normales Stoppzeichen gezeigt. Wurde dieses gesehen, musste so schnell wie möglich ein Knopf betätigt werden, die Reaktionszeit wurde gemessen. Wurde dieses Zeichen nicht gezeigt, musste ein anderer Knopf betätigt werden. Die Ergebnisse zeigten, dass sich die Reaktionszeit infolge einer großen Anzahl von Ablenkungen verlängert, insbesondere wenn die Ablenkungen ähnlich oder gleich aussehen. Des Weiteren

haben Anzahl und Farbe der Ablenkungen einen großen Einfluss auf die Erkennbarkeit des Stoppzeichens. Auch in dieser Studie fehlen Angaben darüber, ob und wie die Erkenntnisse in die Realität übertragen werden können. Zudem stellt sich die Frage, ob die Darbietungszeit von 1,5 Sekunden realitätsnah ist.

ERKE und GOTTLIEB (1979) (in [GOTTLIEB, 1981]) untersuchten, in wie weit die innerstädtische Umgebung Einfluss auf die Ablesbarkeit von Verkehrszeichen nimmt. Dabei untersuchten sie die Merkmale Umgebungshelligkeit, Richtungsanzahl auf Wegweisern, Umgebungsgestaltung und Wegweiserkonzept. Die Umgebungsgestaltung wurde hinsichtlich der Verkehrsstärke und der Art der Werbung (neutral, farblich konkurrierend) variiert. Sie konnten nachweisen, dass die Umgebungshelligkeit keinen Einfluss auf die Reaktionszeit und nur einen geringen, aber nicht statistisch bedeutsamen auf die Fehlerzahl hat. Außerdem konnte kein Einfluss der Verkehrsstärke nachgewiesen werden. Die Werbung hingegen, gleich welcher Art, verlängert die Reaktionszeit um etwa 150 ms; hat aber auf die Fehlerrate keinen Einfluss. Die Wegweiserkonzepte (Kreuzstruktur, Portalwegweiser, Tabellenwegweiser) hingegen beeinflussen die Fehlerzahl sowie die Reaktionszeiten.

Vom WISCONSIN DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (1994) (in [FARBRY ET AL., 2001]) wurde eine Untersuchung zum Einfluss einer Videoleinwand am Milwaukee County Stadium veröffentlicht. In dieser Untersuchung wurde das Unfallgeschehen aus zwei verschiedenen Richtungen (nach Osten und nach Westen fahrend) jeweils für drei Jahre vor und nach der Installation ausgewertet. Für die Fahrtrichtung Ost konnte ermittelt werden, dass infolge der Installation der Videoleinwand sich die Zahl der Unfälle um 36% auf 4,25 Unfälle pro Millionen gefahrene Fahrzeugkilometer erhöhte. Die Zahl der Unfälle mit geparkten Autos nahm um 8% zu, die Auffahrunfälle um 21%. Auch für die Fahrtrichtung West konnte ermittelt werden, dass nach der Installation sich die Zahl der Unfälle um 21% auf 3,53 Unfälle pro Millionen gefahrene Fahrzeugkilometer erhöhte. Die Zahl der Unfälle mit geparkten Autos sowie die Auffahrunfälle nahmen beide um 35% zu. Daraus wurde gefolgert, dass die Videoleinwand einen Einfluss auf die Zahl der Unfälle und somit auf die Verkehrssicherheit ausübt.

2.1.3 Jüngere Untersuchungen

AKAGI ET AL. (1996) untersuchten den Einfluss des visuellen Umfeldes auf die Wahrnehmbarkeit von Verkehrszeichen. Dazu bewerteten sie zunächst verschiedene Umfeldere hinsichtlich des visuellen Lärmquotienten V , der sich aus der Gesichtsfeldfläche und der Gesamtfläche aller Flächen, die visuellen Lärm verursachen, zusammensetzt. Im Anschluss daran wurde von neun Probanden im Alter von 22 bis 66 Jahren das Blickverhalten während der Fahrt auf einer Teststrecke aufgezeichnet, wobei die Probanden auf ein bestimmtes Verkehrszeichen achten sollten. Allgemein konnten sie ermitteln, dass die Anzahl der Fixationen mit zunehmenden visuellen Lärmquotienten ansteigt und die Fixationszeit abnimmt. Hinsichtlich der Wahrnehmungsentfernung von Verkehrszeichen konnte ein geschlechterspezifischer Unterschied ermittelt werden. Demnach vergrößert sich diese bei Männern mit zunehmendem visuellen Lärmquotienten stärker als bei Frauen. Für die Altersgruppe bis 30 Jahre konnte nur ein geringer Anstieg der Wahrnehmungsentfernung verzeichnet werden. Der größte Anstieg lag in den Altersgruppen über 30 und über 60 Jahre. Aufgrund der Tatsache, dass diese

Untersuchung nur mit neun Probanden durchgeführt wurde, können keine allgemeinen Aussagen getroffen werden. Die Autoren merken außerdem an, dass die Ermittlung des visuellen Lärmquotienten weiter verfeinert sowie auch der Einfluss dynamischer Werbetafeln untersucht werden sollte.

SMILEY ET AL. (2002) untersuchten den Einfluss von Videoleinwänden auf das Blickverhalten im innerstädtischen Raum in Toronto, Ontario, Kanada. Insgesamt nahmen 16 Probanden im Alter zwischen 25 und 50 Jahren mit mindestens sechs Jahren Fahrerfahrung an der Untersuchung teil. Die Teststrecke beinhaltete drei Knotenpunkte mit jeweils einer gut sichtbaren Videoleinwand sowie eine Schnellstraße mit einer einzelnen Videoleinwand, 130 m entfernt vom Straßenrand auf der linken Seite und teilweise verdeckt von Häusern und Überführungen. Obwohl die Fahrer bei jeder zweiten Gelegenheit auf die Videoleinwände schauen, gilt die Mehrzahl der Fixationen dem Verkehrsgeschehen. Den Werbetafeln (statisch und dynamisch) gelten hingegen nur ungefähr 2,0% aller Fixationen, wobei Videoleinwände häufiger fixiert werden als die statischen Werbetafeln. Es konnte kein Beweis dafür gefunden werden, dass die Fixation von Videoleinwänden die Anzahl der Fixationen von Verkehrszeichen oder Signalen reduziert. Die Ergebnisse dieser Studie bestätigen die Ergebnisse aus früheren Untersuchungen im innerstädtischen Bereich. Demnach werden Videoleinwände weniger häufig fixiert als Verkehrszeichen und die Mehrzahl der Fixationen gilt der Straße und den anderen Fahrzeugen. Die Autoren merken allerdings an, dass diese Ergebnisse nur für die betrachteten Videoleinwände in diesem speziellen Umfeld gelten.

BEIJER ET AL. (2004) untersuchten den Einfluss von Werbetafeln auf das Blickverhalten an einer Autobahn. Mit Hilfe eines Eye-Tracking-Systems wurden die Fixationszeiten, die Anzahl der Fixationen und den Blickwinkel von insgesamt 25 Probanden aufgezeichnet. Das Alter der Probanden lag zwischen 25 und 50 Jahren. Außerdem besaßen die Probanden den Führerschein seit mindestens fünf Jahre, es wurde von erfahrenen Fahrern hinsichtlich des Blickverhaltens ausgegangen. Die Studie wurde auf einer sechsstreifigen Autobahn (expressway) in Toronto (Kanada) durchgeführt. Die zulässige Geschwindigkeit lag bei 80 km/h. Um eine freie Fahrt und somit ein freies Blickverhalten gewährleisten zu können, wurden die Fahrten außerhalb der Hauptverkehrszeit durchgeführt. Insgesamt konnte der Einfluss von 37 Werbetafeln untersucht werden, darunter statische Werbetafeln, Laufschriften, Prismenwendeanlagen und Videoleinwände. In der Analyse wurden jedoch nur Fixationszeiten berücksichtigt, die länger als 0,75 Sekunden andauerten. Das entspricht insgesamt 22% aller aufgenommenen Fixationen. Dieser Zeitraum wurde als die notwendige Zeit (Minimum) definiert, die ein Fahrer benötigt, um das Abbremsen eines Vorfahrenden wahrzunehmen und darauf zu reagieren. Im Rahmen der Untersuchungen konnte kein Einfluss des Geschlechts oder der Bekanntheit der Strecke auf das Blickverhalten gefunden werden. Bezogen auf die Ausführungsart der Werbung konnte festgestellt werden, dass bewegte oder animierte Werbetafeln häufiger und länger fixiert wurden als statische Werbetafeln. Erklärt wurde dies mit der Steigerung der Attraktivität einer Werbetafel infolge der Bewegung. Des Weiteren wurde herausgefunden, dass der „Standort“ der Werbetafel im Blickfeld (foveal, parafoveal oder peripher) einen größeren Einfluss auf die Anzahl der Fixationen hat, als der seitliche Abstand von der Straße. Zudem wurde ein Unterschied im Blickverhalten zwischen Geraden und Kurven festgestellt. Demnach werden Werbetafeln, die sich im Zentrum des Blickfeldes befinden, öfter

fixiert, unabhängig von deren Abstand vom Straßenrand. Die Autoren fordern deshalb, dass dieser Einfluss bei der Genehmigung des Aufstellortes der Werbetafel berücksichtigt werden soll.

SCHOLLERER ET AL. (2007) untersuchten in einer Fahrsimulatorstudie, welchen Einfluss Werbeplakate am Straßenrand auf die Fahrleistungen haben und in welchem Umfang sich die Probanden an die Werbeeinhalte nach der Untersuchung erinnern konnten. Dazu wurde das Blickverhalten von insgesamt 36 Probanden aufgezeichnet. Bezogen auf die Fahrgeschwindigkeit sowie die Spurhaltung konnte kein direkter Einfluss der Werbeplakate gefunden werden. Anders hingegen waren die Ergebnisse, die die Auswertung des Blickverhaltens lieferte. Demnach wurden die Werbeplakate fixiert, jedoch nahm die Zahl der Fixationen mit zunehmender Plakatdichte nicht zu. Ähnlich verhält sich das Erinnerungsvermögen der Probanden. Die Anzahl der richtig aufgezählten Plakate ist bei 20 Plakaten in etwa genauso hoch wie bei zehn Plakaten. Dabei wurde teilweise beobachtet, dass auch Plakate, die nicht direkt fixiert wurden, richtig genannt werden. Die Autoren erklären dies mit dem Phänomen der peripheren visuellen Informationsverarbeitung. Demnach können Objekte, die sich im parafovealen Bereich befinden, auch ohne direkte Blickzuwendung erkannt werden. In Bezug auf die Spurführung wurde beobachtet, dass nur bei Blickzuwendungen über den parafovealen Bereich hinaus, die Spur nicht gehalten werden konnte. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass auf Autobahnen mit geringer Verkehrsdichte durch nichtanimierte Werbeplakate kein Sicherheitsrisiko zu erwarten ist. Die Autoren wiesen jedoch darauf hin, dass die Wirkung insbesondere sehr auffällig gestalteter Werbeplakate an Autobahnen weiter untersucht werden muss.

KETTWICH ET AL. (2007) untersuchten in einer Feldstudie, in wie weit Werbeanlagen Einfluss auf die Aufmerksamkeit des Fahrers nehmen. Die Untersuchungen fanden im städtischen Gebiet in Deutschland auf unterschiedlichen Straßentypen statt. Dabei wurde das Blickverhalten von 16 Probanden aufgenommen. Anhand erster Auswertungen (zehn Probanden) wurde deutlich, dass während der Fahrt meistens alle Arten von Werbung, ausgenommen einer Videoleinwand, fixiert wurden. Zudem konnte ermittelt werden, dass die Fixationszeiten während der Fahrt kürzer waren als bei Stillstand des Fahrzeugs. Die Fixationszeiten während der Fahrt überstiegen nie 1,5 Sekunden, bei Stillstand des Fahrzeugs wurde dieser Wert jedoch überschritten, ausgenommen die Firmenlogos.

Eine weitere Untersuchung von KETTWICH ET AL. (2008) beschäftigte sich mit der Frage, ob selbstleuchtende Dachwerbung auf Kraftfahrzeugen das Fahrerverhalten beeinflusst. Dazu wurden mehrere Taxen im Stadtgebiet Karlsruhe mit selbstleuchtender Werbung ausgestattet. Insgesamt nahmen zwölf Probanden an der Untersuchung teil. Es wurde das Blickverhalten der Probanden aufgezeichnet und ausgewertet, zudem wurden die Probanden im Anschluss an den Versuch befragt. Die Auswertung des Blickverhaltens ergab, dass im Vergleich zu selbstleuchtender Werbung am Straßenrand (beispielsweise Litfasssäulen, Bushaltestellen) die selbstleuchtende Werbung auf Kraftfahrzeugen im Mittel länger fixiert wird. Die Autoren weisen darauf hin, dass sich mit zunehmendem Bekanntheitsgrad auch die Dauer der Fixationen wieder verkürzt. (vgl. Hawthorneffekt) Die Befragungen ergaben, dass der überwiegende Teil des Probandenkollektivs diese Art der Werbung als nicht störend oder ablenkend empfunden hat.

Die Universität Bremen, Sicherheitswissenschaft wurde durch den Deutschen Verkehrssicherheitsrat e.V. beauftragt, das Sicherheitsrisiko innerörtlicher Werbeanlagen (speziell Wechselwerbung) zu beurteilen. Die Gefahrenwirkung sowie die Ablenkung konnten aufgrund fehlender Daten nur indirekt und annähernd beschrieben werden, daher wird diese Stellungnahme als vorläufig bezeichnet. Es wurde erläutert, welche Faktoren einen Einfluss auf die Informationsaufnahme und -verarbeitung haben und welchen Einfluss der Inhalt der Werbung, die Aufmerksamkeit des Fahrers sowie die Fahrerfahrung auf die Wahrnehmung von Verkehrszeichen ausüben. Jedoch nur durch hinreichende Untersuchungen können die Auswirkungen von Wechselwerbung genauer beschrieben werden. Zudem wurde den Fahrschulen die Aufgabe zugesprochen, die Fahrschüler über die Gefahren durch Wechselwerbung aufzuklären und entsprechend auszubilden. Schlussendlich wurde die Aussage getroffen, dass durch Wechselwerbung keine Ablenkung oder Gefährdung des Fahrers nachzuweisen ist. Wie bereits oben erwähnt, stellt diese Studie allerdings nur eine vorläufige Stellungnahme dar. [UNGERER, o. J.]

2.1.4 Zusammenfassung

Der Einfluss ablenkender Objekte auf die Wahrnehmung von Verkehrszeichen wurde bereits seit den 1950er Jahren untersucht. In den Untersuchungen vor 1990, die sich auf die Auswertung von Unfalldaten beschränkten, konnte zwar überwiegend ein Einfluss nachgewiesen werden, aufgrund der geringen Datenbasis, fehlender Beweise und der Tatsache, dass es sich um Korrelationsstudien handelt, sind diese Ergebnisse jedoch nicht belastbar. Ein weiteres Problem dieser statistischen Analysen stellt die Tatsache dar, dass eine Ablenkung nicht zwangsläufig zu einem Unfall führt. Auch aus den experimentellen Untersuchungen nach 1990 konnte der Einfluss ablenkender Objekte überwiegend nachgewiesen werden. Dazu diene insbesondere die Auswertung des Blickverhaltens und von Reaktionszeiten.

Bisher konnten allerdings keine konkreten Ergebnisse zum Ablenkungspotential nicht-relevanter Informationen in Abhängigkeit von deren Eigenschaften (beispielsweise Anzahl, Größe, Auffälligkeit) ermittelt werden. Zudem fehlen Modelle, die das menschliche Wahrnehmungsverhalten im Straßenverkehr nachbilden. Anhand der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit, insbesondere dem zu erarbeitenden Komplexitätsmodell soll es jedoch möglich werden, die Komplexität eines Straßenszenarios zu berechnen, den Ablenkungseffekt gezielt zu reduzieren und somit die Verkehrssicherheit bei Dämmerung und bei Dunkelheit zu erhöhen.

2.2 Der Begriff Auffälligkeit

2.2.1 Definition

GETZBERGER (1976) definiert die Auffälligkeit eines Objektes mit der Größe der Chance, dass dieses Objekt im Bereich der Fovea abgebildet und identifiziert wird. Er setzt die Auffälligkeit mit dem Anreiz gleich, eine Saccade in Richtung dieses Objektes auszulösen. Des Weiteren beschreibt er die Auffälligkeit als eine Objekteigenschaft, vergleichbar mit der Farbe oder der Helligkeit eines Objektes. (vgl. auch [BERGER, 1993])

Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Verkehrszeichen wahrgenommen wird, ist aber auch von den Eigenschaften des Fahrers abhängig. Zum Einen von der subjektiven Bedeutung des Verkehrszeichens für den Fahrer und zum Anderen von seiner Erwartungshaltung. Der Auffälligkeitswert des Verkehrszeichens wird dabei nicht als ausschlaggebende Voraussetzung gesehen. Nach SÖMEN (1985) (in [BERGER, 1993]) besteht ein Zusammenhang zwischen Auffälligkeit und subjektiv erlebter Vorrangigkeit.

Nach COLE und HUGHES (1984) (in [BAGL ET AL., 1999]) existieren zwei Formen der Auffälligkeit eines Objektes:

Form 1: Das Objekt kann von sich aus auf sich aufmerksam machen, beispielsweise durch verschiedene Eigenschaften.

Form 2: Das Objekt ist aufgrund seiner Platzierung auffällig.

Form 1 der Auffälligkeit macht deutlich, dass ein Objekt (beispielsweise Verkehrszeichen) aufgrund seiner Eigenschaften (beispielsweise Reflexionsgrad, Größe) in einem eher eintönigen Umfeld wahrscheinlich eher wahrgenommen wird, als das gleiche Objekt in einem sehr komplexen Umfeld mit vielen Objekten. Bei Form 2 der Auffälligkeit liegt das Augenmerk auf dem Standort des Verkehrszeichens im Straßenraum. Befindet sich das Verkehrszeichen an einer gewohnten Stelle, so wird es eher wahrgenommen und ist damit auffälliger, als das gleiche Verkehrszeichen an einer ungewohnten Stelle. Diese Aussage wird auch durch die Untersuchungen von THEEUWES (1991) (in [BAGL ET AL., 1999]) und durch die Theorien von BIEDERMAN (1981) (in [GOLDSTEIN, 2002]) gestützt, wonach es einfacher ist, einen Gegenstand wahrzunehmen, wenn sich dieser an einer gewohnten Stelle befindet.

Ist die Auffälligkeit eines peripheren Objektes hoch genug, steigt zudem die Wahrscheinlichkeit, mit der dieses Objekt im Bereich der Fovea Centralis abgebildet, d.h. fixiert wird. Nur dann können dessen Informationen aufgenommen und verarbeitet werden. Demnach besteht ein Zusammenhang zwischen Fixation und Wahrnehmung. [DIEM, 2004]

2.2.2 Untersuchungen

ODESCALCHI (1960) (in [GOTTLIEB, 1981]) prüfte in Feldversuchen, in wie weit sich Größe, Farbe und Kontrast zum Hintergrund auf die Auffälligkeit von Objekten auswirken. Er konnte nachweisen, dass die Auffälligkeit hinsichtlich der Größe bis zu einem bestimmten Wert ansteigt, darüber hinaus jedoch nicht mehr. Außerdem wurde deutlich, dass gelbe und weiße Verkehrsschilder eine hohe Auffälligkeit aufweisen. Hinsichtlich des Kontrastes zum Umfeld ergab sich, dass dunkle Schilder am auffälligsten vor hellen Hintergründen erscheinen, wobei die Lesbarkeit der hellen Schrift eingeschränkt ist. Für Schilder vor dunklen Hintergründen gelten entsprechend die entgegengesetzten Angaben.

Nach COVAULT ET AL. (1967) (in [GOTTLIEB, 1981]) kann eine höhere Auffälligkeit und somit höhere Wahrscheinlichkeit der Informationsaufnahme durch wiederholte Darbietung des Verkehrsschildes erreicht werden. Die Untersuchungen dazu zeigten, dass die Spurhaltung und die Geschwindigkeitsstabilität infolge der Wiederholungen anstiegen. Dem gegenüber stehen die Untersuchungsergebnisse von DIEM (2004), der nachweisen konnte, dass mit zunehmender Wiederholung der

Verkehrszeichen die Häufigkeit und die Zeit der Fixationen abnimmt. Er begründet diese Entwicklung mit der Abnahme der Auffälligkeit des Verkehrszeichens.

GETZBERGER (1976) untersuchte das „Blickverhalten“ in Abhängigkeit verschiedener Objektparameter, wobei es sich um überschwellige Reize handelte. Er führte Paarvergleiche von Testzeichen zunächst im nicht strukturierten Umfeld (zweigeteiltes Leuchtdichteumfeld, hell und dunkel) und später im strukturierten Umfeld (Gitterstruktur mit hellen und dunklen Streifen) durch. Die Probanden mussten dabei durch Knopfdruck die Richtung, in die deren Blick wanderte, bestätigen. Als Testzeichen wurden quadratische Rechteckgitter mit einer bestimmten Anzahl von Linien pro Grad (Ortsfrequenz) und einer festgelegten Größe verwendet. Der Abstand der Probanden zum Beobachterschirm (115x95 cm) betrug 220 cm bzw. 100 cm. Im Folgenden werden die Ergebnisse für die Parameter Leuchtdichte, Testzeichengröße und Kontrast beschrieben:

- **Einfluss der Leuchtdichte:** Für die Bedingung $\Delta L_O > L_U$ (mit $\Delta L_O = L_O - L_U$) besitzen zwei Objekte in Umfeldern unterschiedlicher Leuchtdichte genau dann die gleiche Auffälligkeit, wenn sie gleiche Leuchtdichten haben. Es zeigte sich, dass für die Bedingung $\Delta L_O < L_U$ die Auffälligkeit eines Objektes mit zunehmender Objektleuchtdichte wesentlich stärker ansteigt als für $L_O > L_U$.
- **Einfluss der Testzeichengröße:** Für beide Umfeldern (strukturiert und nicht strukturiert) konnte ein linearer Zusammenhang gefunden werden. Anhand der Ergebnisse konnte kein signifikanter Unterschied bezogen auf die Testzeichenform (quadratische Rechteckgitter, Kreis) sowie keine Abhängigkeit der Auffälligkeit vom Netzhautort (10° bzw. 19° Abstand von der Fovea) ermittelt werden. Mit zunehmender Größe nimmt die Auffälligkeit des Objektes zu.
- **Einfluss des Kontrastes:** Es konnte ein linearer Zusammenhang bis zu Kontrastwerten nahe 1 gefunden werden. Mit ansteigendem Kontrast nimmt die Auffälligkeit des Objektes zu. In Bild 2-1 sind beispielhaft die ermittelten Ergebnisse der Untersuchungen im nicht strukturierten Umfeld dargestellt. Für die Bedingung $\Delta L_O = 70 \text{ cd/m}^2$ ist erkennbar: Je dunkler das Umfeld, desto größer ist die Steigung der Geraden und desto auffälliger ist das Objekt. Zudem konnte ermittelt werden, dass die Strukturierung des Zeichens auffälligkeitssteigernd wirkt, während sich die Strukturierung des Umfeldes kontrastmindernd und somit auch auffälligkeitsmindernd auswirkt.

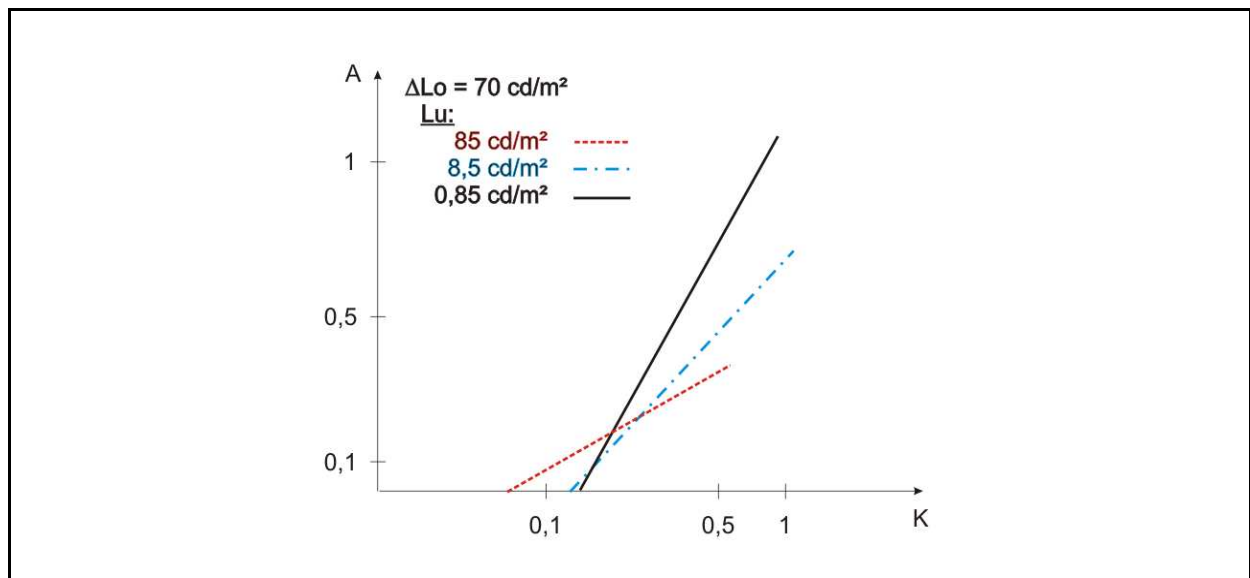


Bild 2-1: Die Auffälligkeit (A) eines Objektes in Abhängigkeit vom Kontrast (K) und der Umfeldleuchtdichte L_u bei konstantem ΔL_o [GETZBERGER, 1976]

3 Beschreibung des Perception-Modells

3.1 Allgemeines

Mit dem Wort *Wahrnehmung* können in der deutschen Sprache zwei verschiedene Begriffe definiert werden. Zum Einen wird der gesamte Prozess der Informationsaufnahme und -verarbeitung, der sich in die Stufen Sehen - Wahrnehmen - Erkennen untergliedern lässt, als Wahrnehmung bezeichnet. Zum Anderen wird der Prozess der Erfassung einer Information, dabei wandeln das Auge und das Gehirn elektromagnetische Wellen in einen Sehreiz um, als Wahrnehmung bezeichnet. In der englischen Sprache werden dafür zwei verschiedene Begriffe verwendet. Zum Einen der Begriff *perception*, welcher den gesamten Prozess der Wahrnehmung beschreibt, zum Anderen der Begriff *sight*, welcher für das Erfassen einer Information in Form eines Sehreizes steht. In der vorliegenden Arbeit wird für den gesamten visuelle Wahrnehmungsvorgang der Begriff *perception* gebraucht. Der Begriff *Wahrnehmung* hingegen steht für das Erfassen einer Information in Form eines Sehreizes.

Nach BERGER (1993) kann *perception* anhand des folgenden Schemas erläutert werden:

1. „Peripheres Wahrnehmen,
2. Blickzuwendung und eventuell erforderliche Akkommodation,
3. Foveales Wahrnehmen und Erkennen,
4. Entscheidung und eventuell Reaktion.“ (vgl. auch [LACHENMAYR, 1987], [ECKERT, 1993])

Demnach gliedert sich das zu entwickelnde Perception-Modell in die Teilmodelle Prozess des Sehens, Prozess des Wahrnehmens und Prozess des Erkennens sowie das Blickverhalten (gesteuert und getriggert).

Im Folgenden werden zunächst die Grundsätze, die bei der Modellbildung zu beachten sind, kurz erläutert. Im Anschluss daran werden die Teilmodelle beschrieben und ein erstes Basismodell des Perception-Modells vorgestellt.

3.2 Die Modellierungsgrundsätze

Der Straßenverkehr ist ein sehr komplexes System, welches zum Einen aus vielen verschiedenen Teilmodellen zusammengesetzt ist und zum Anderen auch in sehr verschiedenartigen Umfeldsituationen stattfindet. Zwischen den einzelnen Teilmodellen existiert eine Vielzahl von Abhängigkeiten und Beziehungen. Es hat sich als sinnvoll erwiesen, den Straßenverkehr als System zu beschreiben, um ihn methodisch analysieren zu können. Das System Straßenverkehr wird dabei als ein Teil der gesamten Umwelt angesehen, der als abgegrenzt gesehen werden kann. „Die Modellbildung erlaubt, die Zusammenhänge in der Gedankenwelt zu analysieren. Die gewonnenen Aussagen können dann wieder in die Wirklichkeit übertragen werden.“ [BALD, 1991]

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, müssen die Modelle gewisse Eigenschaften aufweisen. Sie sollen „abbildungstreu und ökonomisch sowie logisch konsistent und mathematisch korrekt“ sein. Das Modell muss so abbildungstreu wie

möglich dargestellt sein. Nur unter diesen Umständen entsprechen die mit dem Modell gewonnenen Aussagen und Ergebnisse denen der Praxis. Das Modell soll ökonomisch sein, d. h. die „Tiefe“ der Modellierung soll auf den erwarteten Wert der Aussagen beschränkt sein. Um Modelle und deren Ergebnisse nachprüfen zu können sollen sie logisch konsistent und mathematisch korrekt sein. Zwischen den beiden ersten Eigenschaften muss manchmal ein Kompromiss geschlossen werden, da ein genaueres Modell anfänglich schwerer handhabbar ist, aber genauere Ergebnisse liefern würde. Es empfiehlt sich daher zunächst mit einfacheren Modellen zu arbeiten, die im Laufe der Zeit immer weiter verfeinert werden können. [BALD, 1991]

3.3 Der Prozess des Sehens

3.3.1 Überblick

Der Prozess des Sehens beschreibt die Aufnahme der Informationen mithilfe der Photorezeptoren sowie die Umwandlung und Weiterleitung der Informationen in die entsprechenden Areale des Gehirns. (vgl. Anhang, Kapitel A1).

Um die Informationen des Bildausschnittes verarbeiten zu können, muss das Auge auf der einen Seite an die vorherrschende Umfeldleuchtdichte adaptiert sein, auf der anderen Seite muss es auf die Entfernung der Sehobjekte akkomodieren. Sind diese Grundaufgaben des Auges bewältigt, können die visuellen Informationen in Form von Lichtpunkten von den auf der Netzhaut befindlichen Photorezeptoren aufgenommen und verarbeitet werden, ein Netzhautbild wird erzeugt. Das auftreffende Licht wird in elektrische Impulse umgewandelt, welche dann in die zuständigen Hirnareale weitergeleitet und verarbeitet werden können. Die zuständigen Hirnareale errechnen aus dem Gesichtsfeld das physiologisch-psychologische Sehfeld².

3.3.2 Die Sehbereiche

Das Sehen kann aufgrund des Baus der menschlichen Netzhaut, insbesondere der Verteilung der Stäbchen und Zapfen in foveales und peripheres Sehen unterteilt werden.

- Beim fovealen Sehen werden die Objekte direkt fixiert und im Bereich des schärfsten Sehens (Fovea) abgebildet. Die Objekte bzw. geschriebenen Informationen können in diesem Bereich aufgrund des hohen Auflösungsvermögens problemlos erkannt bzw. gelesen werden. Diese Eigenschaft nimmt jedoch mit zunehmender Dunkelheit ab, da die im fovealen Bereich befindlichen Zapfen nur bei hoher Lichtintensität aktiv sind.
- Beim peripheren Sehen werden die Reize eines Objektes, das im peripheren Netzhautbereich abgebildet ist, aufgenommen. In diesem Netzhautbereich sind überwiegend Stäbchen angeordnet, die lichtempfindlich sind. Aufgrund der Anordnung der Rezeptoren ist von einer höheren Lichtempfindlichkeit auszugehen. (vgl. Anhang, Kapitel A1.3)

² Das Sehfeld ist eine subjektive Größe und stellt alle zu einem Zeitpunkt vorhandenen Gesichtswahrnehmungen dar. [BAGL ET AL., 1999]

Nach ECKERT (1993) bestimmt die Komplexität des Umfeldes welche Art des Sehens eintritt. Demnach erfolgt die Informationsaufnahme in komplexen Situationen (Stadtgebiet) ausschließlich über das foveale Sehen, in weniger komplexen Situation (Autobahn) ist zudem das periphere Sehen beteiligt.

Des Weiteren gibt es aufgrund der unterschiedlichen Verteilung der Stäbchen und Zapfen auf der menschlichen Netzhaut und deren unterschiedlichen Empfindlichkeit drei verschiedene Sehbereiche des Menschen. Im photopischen Bereich sind nur die Zapfen aktiv, im skotopischen Bereich die Stäbchen und im mesopischen Bereich sowohl die Zapfen als auch die Stäbchen. Hinsichtlich der Helligkeitsbereiche werden nach CIE (Commission Internationale de l' Eclairage) die drei Sehbereiche wie folgt untergliedert:

- skotopisches Sehen: $L < 0,001 \text{ cd/m}^2$,
- mesopisches Sehen: $0,001 \text{ cd/m}^2 \leq L \leq 3 \text{ cd/m}^2$ und
- photopisches Sehen: $L > 3 \text{ cd/m}^2$. [ECKERT, 1993]

Der Leuchtdichtebereich bei Fahrten in der Dunkelheit mit künstlicher Beleuchtung (fahrzeugeigene Scheinwerfer) liegt im mesopischen Bereich. ([ECKERT, 1993], [LACHENMAYR ET AL., 1996])

3.3.3 Das Gesichtsfeld

Das Gesichtsfeld ist der Bereich, der bei ruhig gehaltenem Kopf und ruhig gehaltenen Augen überblickt werden kann. Die Größe des Gesichtsfeldes ist nicht konstant, sondern hängt von der durchschnittlichen Gesichtsfeldleuchtdichte, der Auffälligkeit der Reize sowie der Wellenlänge des Lichtes ab. Je auffälliger die in der Peripherie befindlichen Reize sind, desto größer ist das Gesichtsfeld. Die Auffälligkeit kann dabei durch eine höhere durchschnittliche Gesichtsfeldleuchtdichte sowie durch eine größere Leuchtdichte und Größe des peripheren Reizes gesteigert werden. Aber auch die Anzahl der Reize hat eine Auswirkung auf die Größe des Gesichtsfeldes; befindet sich eine Vielzahl an Lichtreizen im peripheren Gesichtsfeld, so ist das Gesichtsfeld größer. Infolge Ermüdung, psychischer Ablenkung, Blendung oder Sauerstoffmangel wird die Ausdehnung des Gesichtsfeldes verringert. ([METHLING und PESCHKE, 1987], [GRAMBERG-DANIELSEN ET AL., 1984])

Je nach Bau des menschlichen Schädels werden für die Abmessungen des Gesichtsfelds beider Augen im photopischen Adaptationszustand folgende Werte angegeben:

- 90° nach links und rechts,
- 50° nach oben und
- 70° nach unten. [GRAMBERG-DANIELSEN ET AL., 1984]

Die Abmessungen des Gesichtsfeldes sind jedoch nicht konstant. Allgemein kann angenommen werden, dass das Gesichtsfeld für farbige Reize kleiner ist als für spektral breitbandige Reize. Die Begründung liegt in der Anordnung der Photorezeptoren auf der Netzhaut und der neuronalen Verschaltung der Ganglienzellen im peripheren Netzhautbereich. (vgl. Anhang, Kapitel A1.3.3) In Tabelle 3.1 sind die Ausdehnungen des monokulären Gesichtsfeldes für vier verschiedene Wellen-

bereiche im mesopischen Adaptationszustand (Dämmerung) angegeben. Es ist erkennbar, dass das Farbgesichtsfeld für Blau und Gelb am größten ist, gefolgt von Rot und Grün, wobei das Farbgesichtsfeld für Grün die geringste Ausdehnung aufweist. [METHLING und PESCHKE, 1987]

Wellenlänge Ausdehnung	Blau	Gelb	Rot	Grün
Nach rechts (temporal) ²	50°	65°	65°	65°
Nach links (nasal) ²	33°	25°	15°	10°
Nach oben ¹	25°	25°	20°	18°
Nach unten ¹	25°	25°	20°	18°

Tabelle 3.1: Ausdehnungen des monokulären Gesichtsfeldes (rechtes Auge) für verschiedene Wellenlängen im mesopischen Bereich ¹[METHLING und PESCHKE 1987]; ²(WOODSON und CONOVER, 1964 in [FÄRBER ET AL., 2007])

Das Gesichtsfeld wird in die Bereiche Fovea, Parafovea und Peripherie unterteilt. In verschiedenen Publikationen wird dem fovealen Bereich im photopischen Adaptationszustand (Tag) ein Kegelöffnungswinkel von zwei Grad zugesprochen, dem parafovealen Bereich, der an den fovealen Bereich grenzt, eine Kegelöffnung von acht bis zehn Grad. Der Bereich, der außerhalb der Parafovea liegt, wird als Peripherie bezeichnet. Objekte, die im fovealen Bereich abgebildet sind, können scharf gesehen werden. Je weiter entfernt sie von der Fovea abgebildet werden, desto unschärfer und farbloser werden sie wahrgenommen. Bereits eine Abweichung um drei Grad vom Fixationsort hat eine Verminderung der Sehschärfe um die Hälfte zur Folge. Im peripheren Bereich werden vor allem Bewegungen und Helligkeitsänderungen wahrgenommen. ([SCHWEIGERT, 2003], [PANNASCH, 2003])

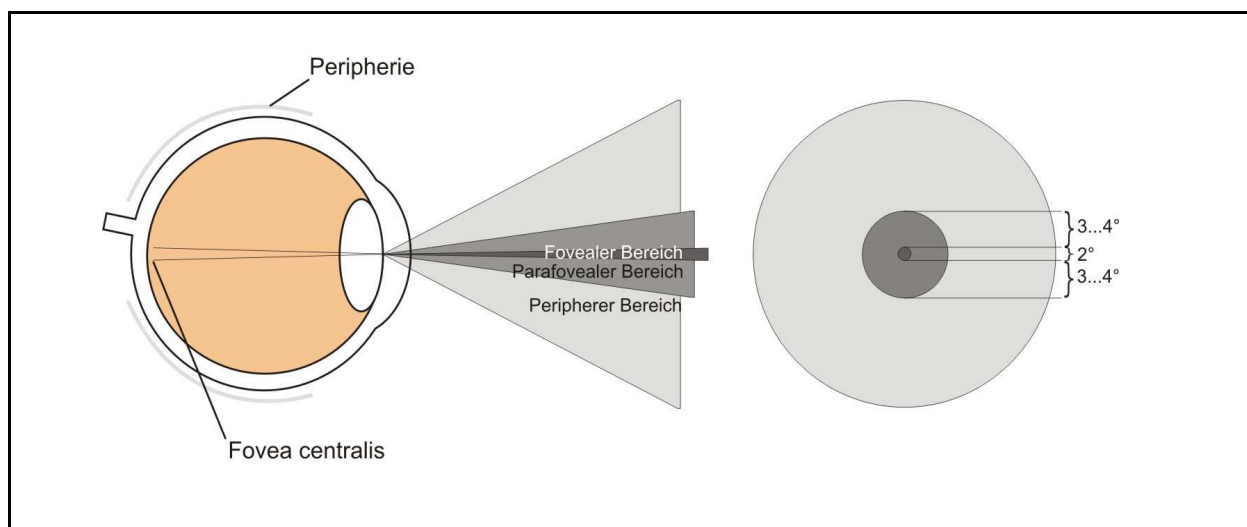


Bild 3-1: Darstellung der Gesichtsfeldbereiche [SCHWEIGERT, 2003], [PANNASCH, 2003]

3.4 Der Prozess des Wahrnehmens

3.4.1 Überblick

Der Prozess des Wahrnehmens beschreibt das Erfassen einer Information. Die visuellen Informationen des Auges werden verarbeitet und zu Einheiten verknüpft.

Wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, errechnet das Gehirn aus dem Gesichtsfeld das Sehfeld, also alle zu einem Zeitpunkt vorhandenen Wahrnehmungen. Dazu werden die neuronalen Signale aus dem Auge in die weiterführenden Hirnareale transportiert, dort verarbeitet und schließlich wieder zu Einheiten verknüpft. (vgl. Anhang, Kapitel A2)

Die visuelle Wahrnehmung läuft in Form eines gesteuerten Prozesses ab. Dieser Prozess kann in die folgenden Stufen untergliedert werden:

- Projektion der Realität auf der Netzhaut,
- Transmission dieser Projektion ins Gehirn,
- Analyse der Projektion durch das Gehirn und
- Blickbewegung und Projektion der „neuen“ Realität auf der Netzhaut. [BERGER, 1993]

3.4.2 Periphere Wahrnehmungsschwellen

Nach LACHENMAYR (1995) müssen drei Bedingungen erfüllt sein, um ein Objekt visuell wahrnehmen zu können. Zunächst, um sichtbar zu sein, muss sich das Objekt im Gesichtsfeld des Betrachters befinden und nicht durch andere Objekte verdeckt werden. Des Weiteren muss der Leuchtdichte- oder Farbkontrast des Objektes höher sein als der physiologische Schwellenwert (Überschwelligkeit)³. Sind diese beiden Bedingungen erfüllt, entscheidet die Auffälligkeit des Objektes zu anderen Objekten über dessen Wahrnehmung. Sind andere Objekte beispielsweise „überschwelliger“, kann die Auffälligkeit des Objektes so enorm vermindert werden, dass es nur schwer oder gar nicht wahrgenommen wird.

Wahrnehmen bedeutet, dass ein Objekt vom Beobachter/Fahrer bemerkt wird. Wird ein Objekt im fovealen Bereich des Gesichtsfeldes abgebildet, also fixiert, kann davon ausgegangen werden, dass dieses Objekt wahrgenommen wird. [DIEM, 2004] Wird das Objekt allerdings im peripheren Bereich abgebildet und wird die periphere Wahrnehmungsschwelle überschritten, wird es wahrgenommen und es erfolgt eine Blickzuwendungssaccade, wodurch das Objekt in den Bereich der Fovea verlagert wird. Aufgrund des immensen Informationsstroms liegen die Werte für die peripheren Wahrnehmungsschwellen im Straßenverkehr jedoch höher als im Labor ermittelt, da „das Problem der Auffälligkeit zum Tragen kommt“. Die periphere Wahrnehmungsschwelle kann nicht als konstante Größe gesehen werden, sie verändert sich mit zunehmendem Abstand des Objektes zur Fovea und mit dem Zustand des Fahrers (Aufmerksamkeitsbeanspruchung, Einfluss von Alkohol,

³ Der physiologische Schwellenwert ist der Grenzwert, bei dem der Mensch das Objekt mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% wahrnimmt. [KUHL, 2006]

Medikamenten, Drogen, Ausfälle im binokularen Zentralen Gesichtsfeld usw.).
[LACHENMAYR, 1987]

Je weiter ein Objekt von der Fovea entfernt abgebildet wird, desto größer muss:

- das Objekt sein,
- der Kontrast zum Umfeld sein,

um den Anstieg der peripheren Wahrnehmungsschwelle zu kompensieren.
[LACHENMAYR, 1987]

3.4.3 Mesopische Wahrnehmungsmodelle

3.4.3.1 Einleitung und physiologische Grundlagen

Es kann davon ausgegangen werden, dass der Straßenverkehr bei Dunkelheit im mesopischen Leuchtdichtezustand stattfindet. Da das Sehen im mesopischen Bereich ein sehr komplexer Vorgang ist, werden in den folgenden Kapiteln die physiologischen Grundlagen sowie die verschiedenen mesopischen Sehmodelle näher erläutert. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden bei der späteren Entwicklung des Komplexitätsmodells berücksichtigt.

Der mesopische Bereich reicht von 10^{-2} cd/m^2 bis 10 cd/m^2 . Es ist davon auszugehen, dass „im oberen mesopischen Bereich die Zapfen noch relativ dominant sind“ und dass „im mittleren und unteren mesopischen Bereich die Stäbchen dominant“ sind. Demnach ist nicht nur eine Wechselwirkung zwischen den verschiedenen Zapfentypen zu erwarten, sondern auch eine Zapfen-Stäbchen-Wechselwirkung. Daher wird im mesopischen Bereich nicht nur von einer spektralen Hellempfindlichkeitsfunktion, vergleichbar mit der $V(\lambda)$ -Funktion bzw. der $V'(\lambda)$ -Funktion, ausgegangen, sondern von unendlich vielen spektralen Hellempfindlichkeitsfunktionen in Abhängigkeit vom jeweiligen Helligkeitsniveau. Daher gilt: Nimmt das Helligkeitsniveau ab, erhöht sich der Beitrag der kurzwelligen Strahlung und der der langwelligen Strahlung sinkt. Steigt das Helligkeitsniveau an, erhöht sich der Beitrag der langwelligen Strahlung und der der kurzwelligen Strahlung sinkt. ([KHANH, 2004a], [KHANH, 2008])

Für das mesopische Sehen sind zwei sehr wichtige Effekte bekannt. Zum Einen der Purkinje-Effekt, wonach im mesopischen Bereich bläuliches Licht heller erscheint als rötliches Licht. Zum Anderen der so genannte Helmholtz-Kohlrausch-Effekt, wonach farbiges Licht heller wahrgenommen wird als es der Leuchtdichte entspricht. Der Purkinje-Effekt ist mit den unterschiedlichen Maxima der spektralen Empfindlichkeiten der Photorezeptoren erklärbar. Während das Maximum beim Zapfensehen (Tag) um 555 nm liegt, befindet es sich beim Stäbchensehen (Nacht) bei etwa 505 nm. „Demzufolge wird [im mesopischen Bereich] eine Strahlung im kurzwelligen blauen Bereich heller wahrgenommen als eine Strahlung im orange-roten langwelligen Bereich.“ Die Erklärung des Helmholtz-Kohlrausch-Effektes liegt darin, dass farbiges Licht neben dem achromatischen Signal „noch zusätzlich chromatische Signale im visuellen System erzeugt“. [KHANH, 2004a]

Die Helligkeitsempfindlichkeit wird neben der Leuchtdichte auch von der Größe des Objektes und seiner Lage auf der Netzhaut beeinflusst. Demnach wird die Helligkeit eines Objektes bei geringer Größe (foveales Sehen) schwerpunktmäßig von den Zapfen bestimmt, bei großen Objekten auch von den Stäbchen. Anhand der

Ergebnisse folgender Untersuchung wird dieser Zusammenhang deutlich: An einem sehr großen Testfeld (64°), welches mit einer blauen Strahlung beleuchtet wurde, liegt im Vergleich zu einer weißen Referenzstrahlung Helligkeitsgleichheit vor. Wird dieses Testfeld nun stark verkleinert (auf 3°) so erscheint dieses Testfeld plötzlich dunkler. Demnach kann davon ausgegangen werden, dass der Purkinje-Effekt nicht nur vom Helligkeitsniveau sondern auch von der Größe des Testfeldes bestimmt wird. Im Hinblick auf die Verteilung der Photorezeptoren auf der Netzhaut übt auch die Position des Objektes einen Einfluss auf Helligkeitsempfindlichkeit aus. Dabei gilt, je weiter das Objekt im extrafovealen Bereich der Netzhaut abgebildet wird, desto größer wird der Einfluss der Stäbchen und umso geringer der Abstand zur Fovea, desto größer der Einfluss der Zapfen. Untersuchungen von KINNEY (1964) (in [KHANH, 2004a]) im mesopischen Bereich zeigten, dass für Testfelder von 2° insbesondere für kurzwellige Strahlung (bläuliche Strahlung) im außeraxialen Bereich (4° extrafoveal) eine geringere Strahldichte zum Abgleich an das Referenzfeld notwendig ist. Befindet sich das Testfeld hingegen direkt im Bereich der Fovea, ist eine höhere Strahldichte zum Abgleich erforderlich. Auch dieses Phänomen lässt sich mit dem Purkinje-Effekt erläutern. Im außeraxialen Bereich befinden sich vermehrt Stäbchen, deren Hellempfindlichkeitsmaxima im Bereich der bläulichen Strahlung liegt. Demnach wird bläuliche Strahlung als heller empfunden als orange-rötliche Strahlung mit vergleichbarer Leuchtdichte. [KHANH, 2004a]

Nach BODROGI ET AL. (2008) und ELHOLMA ET AL. (2005) gibt es zwei verschiedene Arten von mesopischen Sehmodellen. Seit den 1950er Jahren bis hin zu den 2000er Jahren wurden die so genannten Helligkeitsmodelle entwickelt, die auf Untersuchungen beruhen, in denen die Helligkeit eines Testfeldes mit der eines Referenzfeldes abgeglichen wurde. Zu Beginn des 21. Jahrhunderts wurden die ersten Sehleistungsmodelle entwickelt, die auf Ergebnissen von Untersuchungen zur Reaktionszeit und dem Kontrast beruhen. Im Folgenden werden diese verschiedenen Modellarten mit ihren verschiedenen Beispielen näher beschrieben.

3.4.3.2 Helligkeitsmodelle

Beim Sehen im mesopischen Bereich liefern die Stäbchen und die Zapfen Signale, die an das Gehirn weitergeleitet und dort verarbeitet werden. (vgl. Anhang, Kapitel A1) In Bild 3-2 ist ein Modell der Helligkeitswahrnehmung dargestellt. Je nach dem in welchem Adaptationszustand sich der Mensch befindet, sind entweder die Zapfen oder die Stäbchen oder beide aktiv. Beim Tagessehen wird die Helligkeit aus den achromatischen und chromatischen Signalen der Zapfen bestimmt. Dabei liefern die zwei Gegenfarbenmechanismen Rot/Grün (R/G) und Gelb/Blau (Y/B) den chromatischen Anteil des Helligkeitseindrucks. Beim Dämmerungssehen hingegen sind beide Photorezeptoren aktiv. Demnach wird der Helligkeitseindruck neben den achromatischen und chromatischen Signalen der Zapfen auch von achromatischen Signalen der Stäbchen bestimmt. [SAGAWA, 2006]

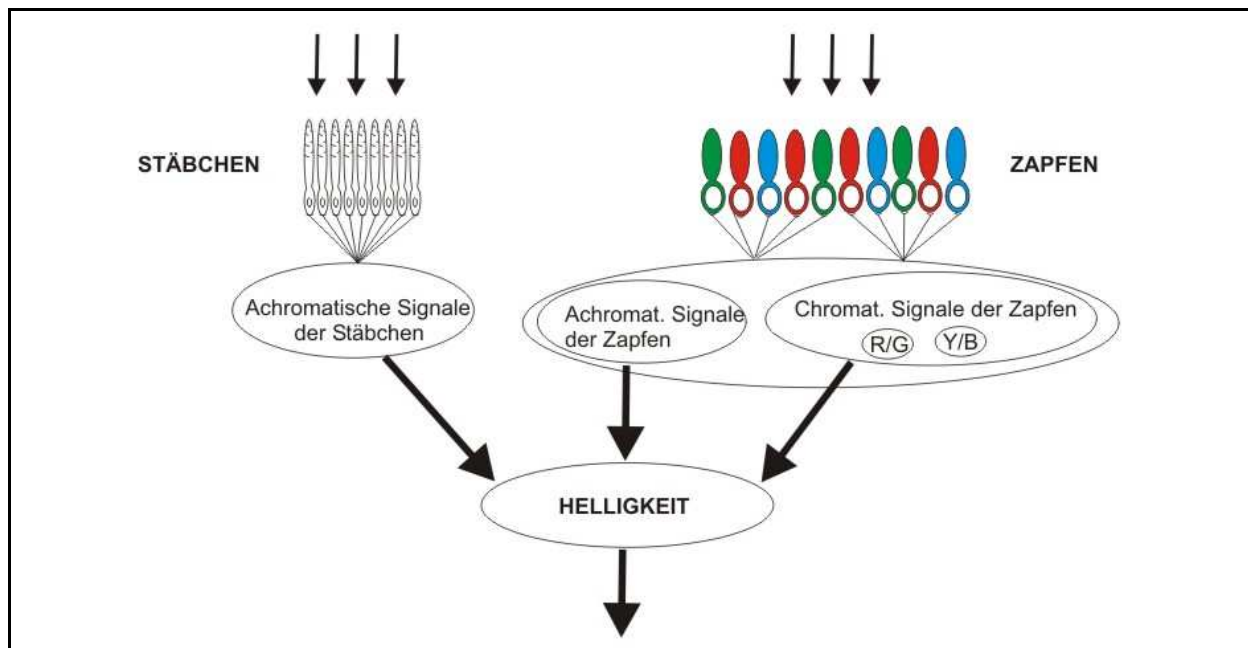


Bild 3-2: Basismodell der Helligkeitswahrnehmung [SAGAWA, 2006]

Für den photopischen Bereich existieren bereits verschiedene Modelle, die den Einfluss der chromatischen Signale auf den Helligkeitseindruck widerspiegeln. Bereits seit den 1970er Jahren wurden Modelle und empirische Formeln entwickelt, die der Beschreibung des Helmholtz-Kohlrausch-Effektes dienen. Dabei wird zwischen den 2°-Sehwinkel-Modellen und den 10°-Sehwinkel-Modellen unterschieden. Zu den wichtigsten 2°-Sehwinkel-Modellen zählen die Verfahren von Ware und Cowan, von Guth, von Yaguchi und Ikeda sowie von Nakano. Die wichtigsten Vertreter der 10°-Sehwinkel-Modelle sind Palmer, Kokoschka sowie Nakano und Ikeda. Im Folgenden werden diese Verfahren kurz vorgestellt. (in [KHANH, 2004a])

2°-Sehwinkel-Modelle

Das Verfahren von Ware und Cowan basiert auf der Annahme, dass „die Helligkeit von farbigen Lichtern [...] durch ein Helligkeit-zu-Leuchtdichte-Verhältnis B/L ausgedrückt werden kann“. Dabei wird die Leuchtdichte L über den Faktor c (vgl. Formel 3-1) in die Helligkeitsgröße B (vgl. Formel 3-2) umgewandelt. [KHANH, 2004a]

$$c = 0,256 - 0,184y - 2,527xy + 4,656x^3y + 4,657xy^4 \quad \text{Formel 3-1}$$

$$B/L = 10^c \quad \text{Formel 3-2}$$

Das Verfahren von Guth ist ein Vektor-Modell, basierend auf den Ergebnissen seiner visuellen Untersuchungen aus den Jahren 1968 bis 1980. Dabei wird die äquivalente Leuchtdichte L_{aeq} aus den Werten A , T und D berechnet, wobei A den achromatischen Anteil und T sowie D den chromatischen Anteil widerspiegeln. (vgl. folgende Formeln) Diese drei Werte stellen Koordinaten in einem dreidimensionalen System dar. ([KHANH, 2004a], [SAGAWA, 2006])

$$A = 0,9341Y \quad \text{Formel 3-3}$$

$$T = 0,7401X - 0,6801Y + 0,1567Z \quad \text{Formel 3-4}$$

$$D = -0,0061X - 0,0212Y + 0,0314Z$$

Formel 3-5

$$L_{aeq} = (A^2 + T^2 + D^2)^{1/2}$$

Formel 3-6

Yaguchi und Ikeda entwickelten das Vektor-Modell von Guth weiter zum Yaguchi-Ikeda-Verfahren. Dabei konnten einige Nachteile des Vektor-Modells beseitigt werden. Dazu zählten die Frage der Superadditivität der Helligkeit sowie die Unsymmetrie der Nichtadditivität unter bestimmten Umständen. Die Bestimmung der äquivalenten Leuchtdichte erfolgt unter schrittweiser Annäherung. Aufgrund der Tatsache, dass dieses Modell nur auf den Ergebnissen einer Testperson basiert, ist eine allgemeine Anwendung nicht möglich. ([KHANH, 2004a], [SAGAWA, 2006])

$$A = Y$$

Formel 3-7

$$C1 = 0,758X - 0,736Y - 0,156Z$$

Formel 3-8

$$C2 = 0,024Y - 0,029Z$$

Formel 3-9

$$1 = (A/L_{aeq})^2 + (C1/L_{aeq})^{1,28} + (C2/L_{aeq})^{0,72}$$

Formel 3-10

Beim Verfahren von Nakano wird die äquivalente Leuchtdichte aus zwei „Konversionsfaktoren“, dem skotopischen und dem photopischen bestimmt (Helligkeit-zu-Leuchtdichte-Verhältnis). Dabei ergibt sich der skotopische Konversionsfaktor aus dem Verhältnis von L' (skotopische Leuchtdichte) zu L (photopische Leuchtdichte). Hingegen wird der photopische Konversionsfaktor aus den Normfarbwertanteilen x und y des CIE 1931-Farbsystems berechnet. Somit kann davon ausgegangen werden, dass dieses Modell alle Einflussfaktoren, die auf den Helligkeitseindruck wirken, enthalten. Es konnte nachgewiesen werden, dass dieses Modell über alle Testfarben am ausgeglichensten ist. [KHANH, 2004a], [KHANH und HACKER, 2006] Auch von der CIE wurde dieser mathematische Zusammenhang als der am meisten geeignete eingestuft. Obwohl das von NAKANO (1986) (in [SAGAWA, 2006]) aufgestellte System nur für das 2°-Feld entwickelt wurde, kann es auch für das 10°-Feld eingesetzt werden. SAGAWA ET AL. (1993) (in [SAGAWA, 2006]) wiesen nach, dass für das 10°-Feld das Helligkeit-zu-Leuchtdichte-Verhältnis geringfügig höher liegt, wobei diese Unterschiede im Gegensatz zur Abnahme der Leuchtdichte deutlich kleiner sind. In der folgenden Formel 3-11 ist der mathematische Zusammenhang nach NAKANO (1986) (in [SAGAWA, 2006]) für das 2°-Feld dargestellt.

$$\begin{aligned} \log(L_{eq}/L) = & (1/2)\log(-0,0054 - 0,2x + 0,77y + 1,44x^2 - 2,97xy \\ & + 1,59y^2 - 2,11zy^2) - \log y \end{aligned}$$

Formel 3-11

10°-Schwinkel-Modelle

Palmer entwickelte zwischen 1968 und 1981 zwei Verfahren zur Bestimmung der äquivalenten Leuchtdichte. Diese berechnen sich aus der photopischen Leuchtdichte L_{10} und der skotopischen Leuchtdichte L' . Daher wird das zugrunde liegende Modell

auch Zweikomponentenmodell genannt. Die chromatischen Anteile werden allerdings nicht berücksichtigt. [KHANH, 2004a]

Palmer-Verfahren 1

$$L_{aeq} = a \cdot L' + (1-a)L_{10} \quad \text{Formel 3-12}$$

$$a = 0,4 \text{cd/m}^2 / (L_{10} + 0,04 \text{cd/m}^2) \quad \text{Formel 3-13}$$

Palmer-Verfahren 2

$$L_{aeq} = (M \cdot L')^{0,5} + L_{10} + 0,5 \cdot M - \{M \cdot [(M \cdot L')^{0,5} + L_{10} + 0,25 \cdot M]\}^{0,5} \quad \text{Formel 3-14}$$

$$\text{mit } M = 0,06 \text{cd/m}^2$$

$$L_{10} = 683 \int L(\lambda) \cdot V_{10}(\lambda) d\lambda \quad \text{Formel 3-15}$$

Bei den Verfahren nach Nakano und Ikeda sowie nach Kokoschka werden die Helligkeitsinformationen sowohl der Stäbchen als auch der Zapfen berücksichtigt. Bei den Zapfen werden dabei auch die Helligkeitsinformationen, die aufgrund der Farbe erzeugt werden, einbezogen. Demnach gehen vier Einflussgrößen in das Modell ein, das Modell wird auch als Vierkomponentenmodell bezeichnet. Die Unterschied der beiden Verfahren liegt in der Verwendung einer Referenzstrahlung. [KHANH, 2004a]

Nach Meinung der CIE und anhand verschiedener Untersuchungen von KHANH konnte keines der oben beschriebenen Verfahren für das 10°-Sehfeld als das am besten geeignete identifiziert werden. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Verfahren sind nicht sehr groß. ([KHANH, 2004a], [KHANH, 2006])

Basierend auf den zuvor beschriebenen Grundlagen entwickelte SAGAWA (2006) das im Folgenden beschriebene Modell, welches derzeit den entsprechenden Gremien (CIE, Division 1 'Vision and Colour') noch zur formalen Prüfung vorliegt. Es wird allerdings davon ausgegangen, dass dieses Modell von der CIE empfohlen wird. Die wichtigste Aufgabe, die es zu lösen galt, war die Frage der Kombination der drei Signale. In Bild 3-3 sind diese zwei Möglichkeiten (a und b) für den mesopischen Bereich dargestellt. Im Modell a) wird davon ausgegangen, dass die chromatischen Signale der Zapfen zunächst mit den achromatischen Signalen der Zapfen kombiniert werden und danach das kombinierte Signal der Zapfen mit dem achromatischen Anteil der Stäbchen zusammengefasst wird. Dabei geht das kombinierte Signal der Zapfen mit einem Wichtungsfaktor von a ein, das Signal der Stäbchen mit einem Wichtungsfaktor von $(1-a)$. Im Modell b) hingegen wird davon ausgegangen, dass zunächst die achromatischen Signale der Zapfen und Stäbchen miteinander kombiniert werden, wobei wiederum das Signal der Zapfen mit einem Wichtungsfaktor von a eingeht, das Signal der Stäbchen mit einem Wichtungsfaktor von $(1-a)$. Das kombinierte achromatische Signal wird danach mit dem chromatischen Signal der Zapfen zusammengefasst, wobei dieses mit dem Wichtungsfaktor a_c belegt ist. Dadurch kann der chromatische Anteil vom achromatischen Anteil (Stäbchen-Zapfen-Wechselwirkung) differenziert werden. Somit kann gewährleistet werden, dass im hochphotopischen Bereich dem zunehmenden Einfluss des chromatischen Anteils Rechnung getragen wird. Diese

beiden Modelle wurden bereits eingeführt und beruhen auf bereits existierenden Modellen. [SAGAWA, 2006]

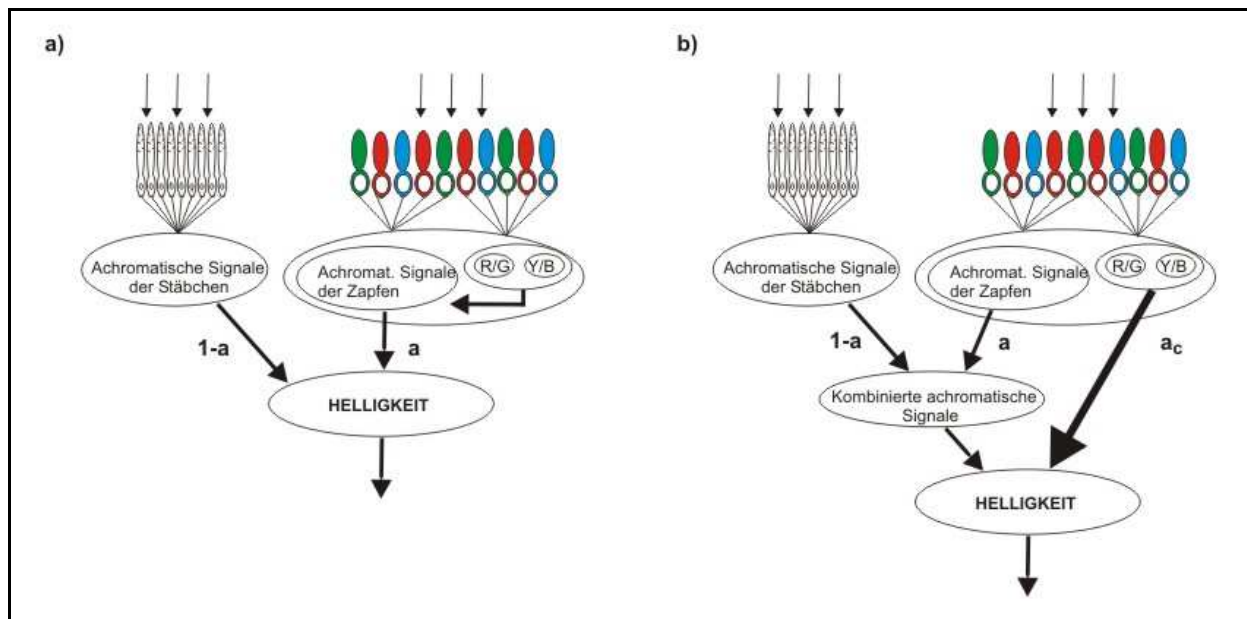


Bild 3-3: Modelle für verschiedene Möglichkeiten des Einflusses der chromatischen Signale auf die Helligkeit im mesopischen Bereich [SAGAWA, 2006]

Das von SAGAWA (2006) entwickelte „ergänzende photometrische“ Helligkeitsmodell ist im folgenden Bild 3-4 abgebildet. Dieses Modell basiert auf den folgenden Annahmen: Für den chromatischen Anteil der Helligkeitswahrnehmung gilt der formulierte mathematische Zusammenhang von Nakano nach Formel 3-11. Dieser Zusammenhang wurde bereits von KHANH und der CIE als der am besten geeignete eingestuft. ([KHANH, 2004a], [KHANH, 2006]) Für die Kombination der chromatischen und achromatischen (Stäbchen und Zapfen) Anteile gilt das in Bild 3-3 dargestellte Modell b). Die Adaptationskoeffizienten für die achromatischen bzw. chromatischen Anteile werden nach den in Bild 3-4 beschriebenen mathematischen Zusammenhängen unter den angegebenen Parametereinstellungen ermittelt. Der mathematische Zusammenhang für den Adaptationskoeffizienten a ähnelt dem von Palmer im Verfahren 1 ermittelten. Dieser Zusammenhang wird mit veränderten Parametereinstellungen auch für den chromatischen Anteil genutzt, wobei durch den Faktor k der wachsende Einfluss des Helligkeit-zu-Leuchtdichte-Verhältnisses im hochphotopischen Bereich ausgedrückt wird. [SAGAWA, 2006]

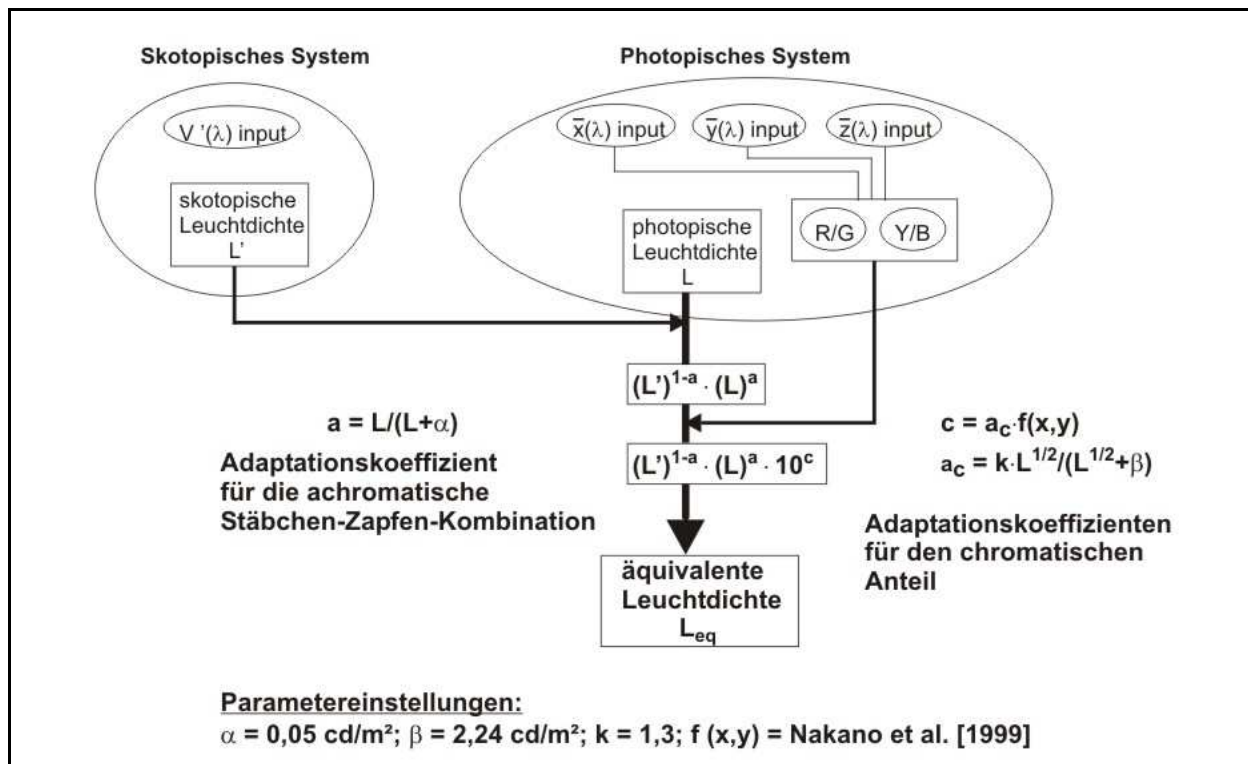


Bild 3-4: Vorgeschlagenes ergänzendes Modell der Photometrie [SAGAWA, 2006]

Nach dem vorgeschlagenen Modell von SAGAWA (2006) ergeben sich folgende mathematische Zusammenhänge zur Ermittlung der äquivalenten Leuchtdichte L_{eq} :

Ansatz 1 (nur achromatische Anteile)

$$\log(L_{eq}) = a \cdot \log(L) + (1-a) \cdot \log(L') \quad \text{Formel 3-16}$$

$$\text{mit : } a = L / (L + 0,05) \quad \text{Formel 3-17}$$

Ansatz 2 (chromatische und achromatische Anteile)

$$\log(L_{eq}) = a \cdot \log(L) + (1-a) \cdot \log(L') + c \quad \text{Formel 3-18}$$

$$\text{mit : } a = L / (L + 0,05) \quad \text{Formel 3-19}$$

$$\text{mit : } c = a_c \cdot f(x,y) \quad \text{Formel 3-20}$$

$$\text{mit : } a_c = k \cdot L^{1/2} / (L^{1/2} + 2,24) \quad \text{Formel 3-21}$$

3.4.3.3 Sehleistungsmodelle

Seit Ende der 1990er Jahre wuchs das internationale Interesse, ein mesopisches Sehmodell auf der Grundlage von Daten, die bei der Erfüllung der Sehaufgabe erzeugt wurden, zu entwickeln. Dieses Modell spiegelte demnach die Realität besser wider, da beim Fahren eines Fahrzeugs das Wahrnehmen und Erkennen von Objekten relevanter ist als die Bewertung der Helligkeit der Objekte.

Die wichtigsten Sehleistungsmerkmale sind die Wahrnehmungsschwelle (Kann es wahrgenommen werden?), die Reaktionszeit (Wie schnell kann es wahrgenommen werden?) und Erkennbarkeitsschwelle (Was ist es?). Im Folgenden werden diese drei Merkmale definiert und die neuesten Untersuchungsergebnisse näher beschrieben.

Die **Wahrnehmungsschwelle** wird als „die Fähigkeit, gerade noch einen visuellen Reiz wahrnehmen zu können“ definiert. Die Ergebnisse der Untersuchungen in Bild 3-5 zeigen eine spektrale Empfindlichkeitsfunktion mit zwei oder drei Maxima. Dieser Effekt wird auf den Einfluss der Gegenfarbenkanäle zurückgeführt. Insbesondere im niedrigen Leuchtdichtebereich ist der chromatische Beitrag für die periphere Wahrnehmung signifikant. [FREIDING ET AL., 2007]

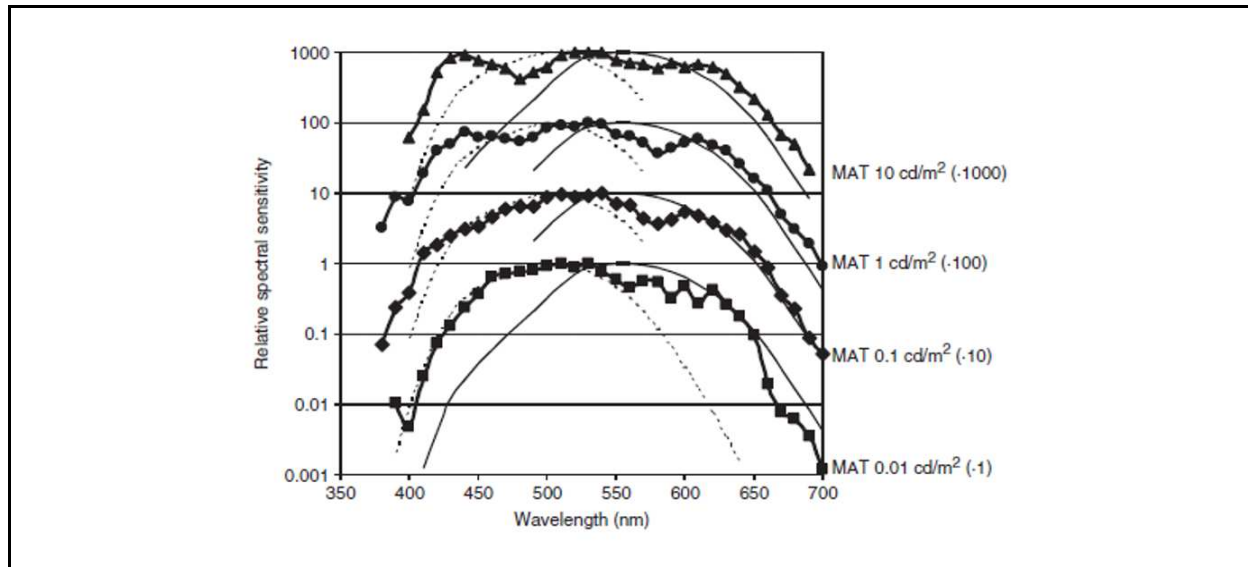


Bild 3-5: Durchschnittliche spektrale Empfindlichkeit von fünf Probanden für ein 2°-Objekt bei peripherer Wahrnehmung (10°) für unterschiedlichen Hintergrundleuchtdichten [FREIDING ET AL., 2007]

Weitere Untersuchungen zeigten, dass beim peripheren Sehen im mesopischen Bereich mit zunehmender Leuchtdichte die Kontrastschwelle sinkt. (vgl. Bild 3-6) Die Kontrastschwelle im niedrigen Leuchtdichtebereich liegt für rote Reize deutlich höher als für andere farbliche Reize wie beispielsweise Grün oder Blau. [FREIDING ET AL., 2007]

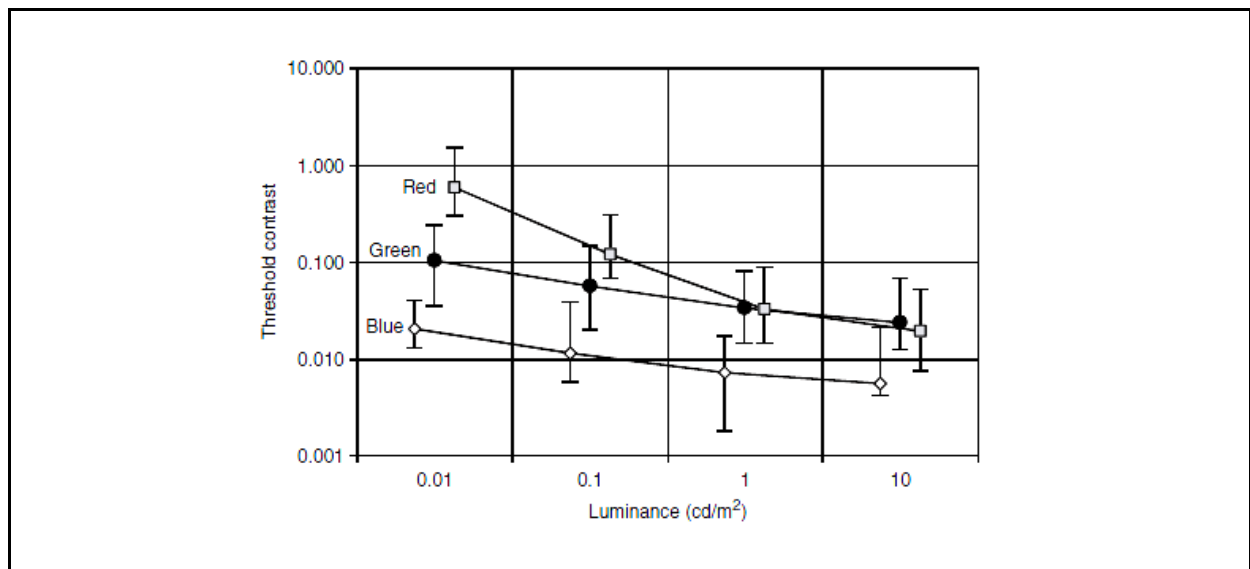


Bild 3-6: Durchschnittliche Kontrastschwelle von fünf Probanden bei peripherer Wahrnehmung (10°) für unterschiedliche Objekt-Farben bei unterschiedlichen Hintergrundleuchtdichten [FREIDING ET AL., 2007]

Die **Reaktionszeit**, die einen sehr wichtigen Teil des kognitiven Prozesses beim Fahren darstellt, wird definiert als die Zeit vom Erscheinen eines Objektes in der Peripherie bis zum Auslösen einer Saccade. Sie ist ein Indikator für die Sichtbarkeit von Objekten. Nach WALKEY ET AL. (2007) verändert sich die spektrale Empfindlichkeit der Reaktionszeit für kleine peripher präsentierte Objekte mit der Leuchtdichte. Sie nähert sich der $V'(\lambda)$ -Funktion bei $0,01 \text{ cd/m}^2$ an. Für mittelgroße (2°) peripher präsentierte Objekte konnte eine spektrale Empfindlichkeitsfunktion mit drei Maxima ermittelt werden, welche die Aktivität der chromatischen (Zapfen) und achromatischen Kanäle (Zapfen und Stäbchen) widerspiegelt. (vgl. Bild 3-7)

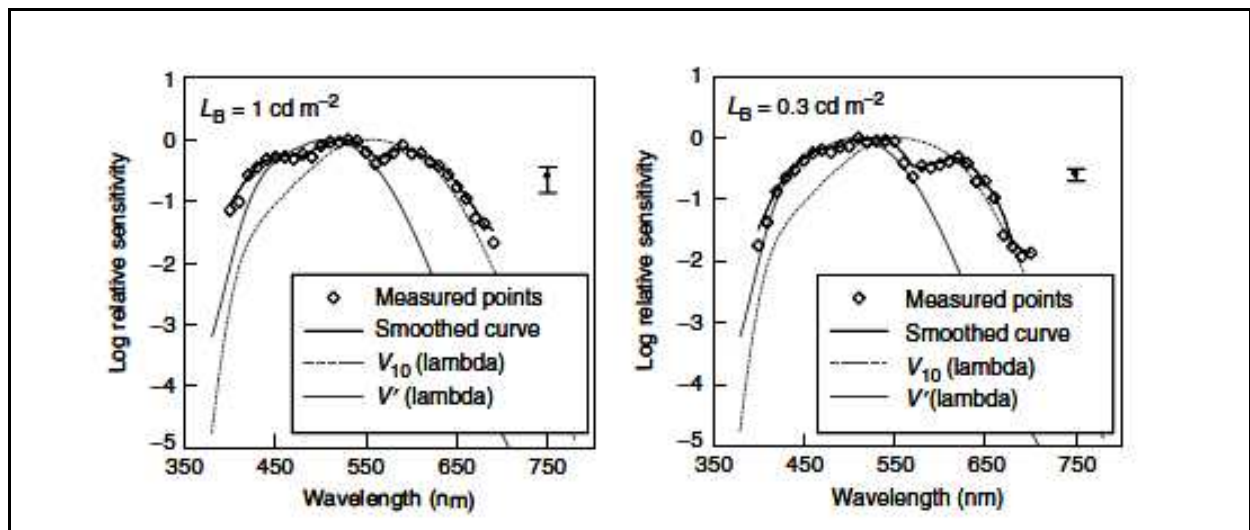


Bild 3-7: Spektrale Empfindlichkeitskurve von fünf Probanden für ein 2° -Objekt bei peripherer Wahrnehmung (10°) für die Hintergrundleuchtdichten von 1 cd/m^2 (links) und $0,3 \text{ cd/m}^2$ (rechts) [WALKEY ET AL., 2007]

Der **Erkennbarkeitsschwelle** von Objekten wird gerade beim Fahren in der Nacht eine hohe Bedeutung beigemessen, denn es ist sehr wichtig, das richtige Fahrmanöver (beispielsweise Bremsen) rechtzeitig einleiten zu können. Aus den Untersuchungen von VÁRADY ET AL. (2007) wurde deutlich, dass sowohl für die

foveale als auch für die periphere Beobachtung die spektrale Empfindlichkeit für Wellenlängen unter 520 nm höher ist als die $V(\lambda)$ -Funktion. Die Tatsache, dass für die periphere Beobachtung eine geringfügig höhere Empfindlichkeit im Kurzwellenbereich auftritt, wird als Nachweis für die zunehmende Aktivität der Stäbchen in der Peripherie gesehen. Für die Wellenlängen oberhalb von 530 nm gilt für beide Beobachtungsarten, dass sich die Empfindlichkeitskurven für die Hintergrundleuchtdichten 0,1 und 1 cd/m² der $V(\lambda)$ -Funktion sehr stark annähern, für die Hintergrundleuchtdichte 0,01 cd/m² ist die spektrale Empfindlichkeit geringer als die $V(\lambda)$ -Funktion. (vgl. Bild 3-8) Zudem ergaben sich in den Empfindlichkeitskurven (foveal und peripher) für die Hintergrundleuchtdichten 0,01 und 0,1 cd/m² zwei ausgeprägte Maxima (520 nm und 580 nm), für die Hintergrundleuchtdichte 1 cd/m² sind diese Maxima wenig ausgeprägt.

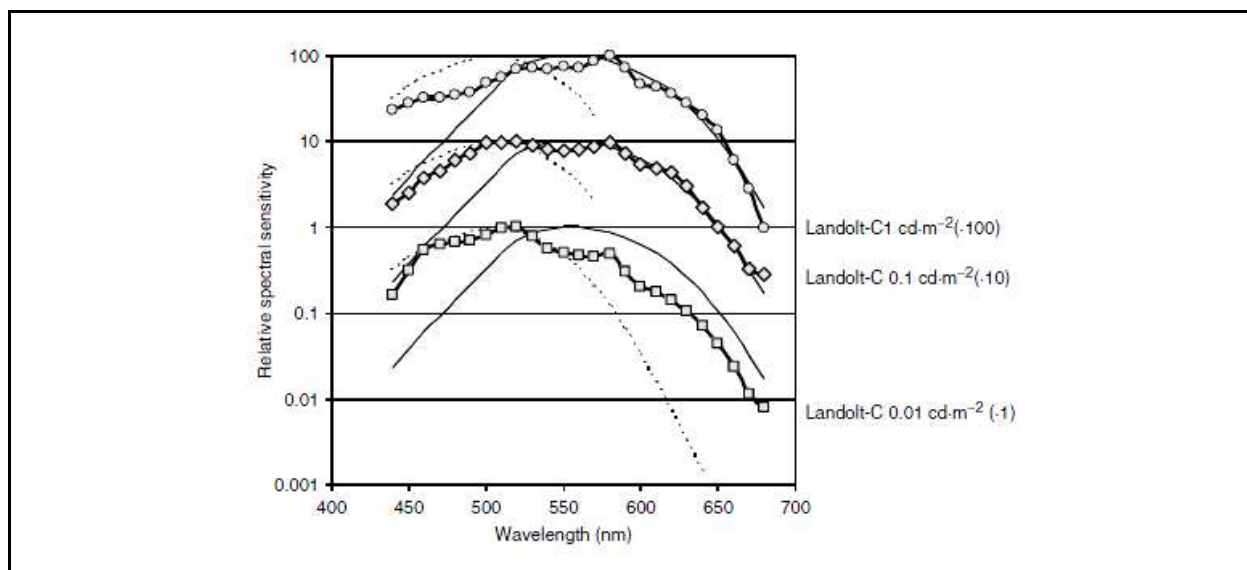


Bild 3-8: Durchschnittliche spektrale Empfindlichkeit von zehn Probanden für einen 2°-Landolt-Ring und peripherer Wahrnehmung bei unterschiedlichen Hintergrundleuchtdichten [VÁRADY ET AL., 2007]

Aus dem Vergleich der Ergebnisse aus Bild 3-5 und Bild 3-8 wird deutlich, dass die Unterschiede zwischen Wahrnehmen und Erkennen für die periphere Beobachtung mit abnehmender Hintergrundleuchtdichte immer geringer werden. Für die Hintergrundleuchtdichte von 0,01 cd/m² konnten VÁRADY ET AL. (2007) keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden, ähnliche Ergebnisse konnten auch für die foveale Beobachtung erzielt werden.

Zu den wichtigsten mesopischen Sehleistungsmodellen zählen das X-Modell und das MOVE-Modell. Der größte Unterschied zwischen diesen beiden Modellen ist die Lage der Grenze zwischen dem mesopischen und dem photopischen Bereich. Zudem werden die Adaptationskoeffizienten unterschiedlich ermittelt, was zu unterschiedlichen Ergebnissen führt. Außerdem wird in keinem der beiden Modelle der chromatische Anteil berücksichtigt, wodurch die Genauigkeit dieser Modelle in Frage gestellt werden kann. Anhand der Erkenntnisse aus diesen zwei Modellen wurde vom TC1-58 ein so genanntes „Zwischen“-Modell erarbeitet, wobei die Schwellen zwischen den Bereichen verändert wurden. Alle drei Modelle basieren auf der Annahme, dass die mesopische Photometrie $V_{mes}(\lambda)$ sich aus der linearen

Kombination zwischen photopischer ($V(\lambda)$) und skotopischer ($V'(\lambda)$) Leuchtdichtefunktion ergibt. (vgl. Formel 3-22) ([CIE, 2009], [BODROGI ET AL., 2008])

Im Folgenden werden diese drei Modelle näher erläutert.

Das X-Modell beruht auf dem in Formel 3-22 dargestellten Sachverhalt. Der Faktor x , im X-Modell als X bezeichnet, charakterisiert das Verhältnis der photopischen Leuchtdichte bei verschiedenen Leuchtdichteniveaus. Dieses Modell gilt für den mesopischen Bereich mit den Grenzen $0,001 \text{ cd/m}^2$ (zum skotopischen Bereich) und $0,6 \text{ cd/m}^2$ (zum photopischen Bereich). Die zur Modellierung genutzten Daten wurden mit Hilfe einer Reaktionszeitmethode (binokulare Simultanitätsmethode) ermittelt. Die Berechnung des Faktors X ist in Formel 3-23 bzw. Formel 3-24 dargestellt, wobei L_{mes} die mesopische Leuchtdichte, L_P die photopische Leuchtdichte und L_S die skotopische Leuchtdichte darstellen. $V_{\text{mes}}(\lambda)$ wird nach Formel 3-22 berechnet. ([CIE, 2009], [BODROGI ET AL., 2008])

$$V_{\text{mes}}(\lambda) = x \cdot V(\lambda) + (1-x) \cdot V'(\lambda) \quad \text{Formel 3-22}$$

$$X = m \cdot L_{\text{mes}} + \beta \quad \text{Formel 3-23}$$

mit : $m = 1/0,599$ und $\beta = -0,001/0,599$

$$L_{\text{mes}} = 0,834 \cdot L_P - 0,335 \cdot L_S - 0,2 + \sqrt{(0,696 \cdot L_P^2 - 0,333 \cdot L_P - 0,56 \cdot L_P L_S + 0,113 \cdot L_S^2 + 0,537 \cdot L_S + 0,04)} \quad \text{Formel 3-24}$$

Das MOVE-Modell ist ähnlich dem X-Modell und wurde im Rahmen des europäischen MOVE-Projektes erarbeitet. Dabei wurde die Fahraufgabe bei Nacht in drei Unteraufgaben gegliedert, der Wahrnehmung des Objektes, der Wahrnehmungsgeschwindigkeit und dem Erkennen des Objektes. Anhand zahlreicher Untersuchungen an unterschiedlichen Institutionen wurden diese drei Unteraufgaben analysiert. Auch dieses Modell beruht auf dem in Formel 3-22 dargestellten Sachverhalt. Als Grenzen des mesopischen Bereiches gelten in diesem Modell $0,01 \text{ cd/m}^2$ als Schwelle zum skotopischen Bereich und 10 cd/m^2 als Schwelle zum photopischen Bereich. $V_{\text{mes}}(\lambda)$ wird nach Formel 3-25 berechnet, einer leicht abgewandelten Form der Formel 3-22. Diese kleine Veränderung (Faktor $M(x_n)$) wurde eingeführt, damit $V_{\text{mes}}(\lambda)$ einen Maximalwert von 1 erreicht. Der Faktor x ist abhängig von der Adaptationsleuchtdichte und dem Spektrum und muss nach Formel 3-26 ebenso wie L_{mes} nach Formel 3-27 iterativ bestimmt werden. Des Weiteren wird das Maximum der Leuchtdichtewirksamkeit im photopischen Bereich mit K_P , im skotopischen Bereich mit K_S bezeichnet. Als Werte gelten für $K_P = 683 \text{ lm/W}$ und für $K_S = 1699 \text{ lm/W}$. Der Wert für $V'(\lambda_0) = 683/1699$, er entspricht dem Wert von $V'(\lambda)$ bei einer Wellenlänge von 555 nm , dem Maximum von $V(\lambda)$. [CIE, 2009]

$$M(x_n) \cdot V_{mes}(\lambda) = x \cdot V(\lambda) + (1-x) \cdot V'(\lambda) \quad \text{Formel 3-25}$$

$$x_{n+1} = a + b \cdot \log_{10}[1/M(x_n)(x_n \cdot L_P/K_P + (1-x_n) \cdot L_S/K_S)] \quad \text{Formel 3-26}$$

mit : $a = 1,49$ und $b = 0,282$

$$L_{mes} = [x \cdot L_P + (1-x) \cdot L_S \cdot V'(\lambda_0)]/[x + (1-x) \cdot V'(\lambda_0)] \quad \text{Formel 3-27}$$

$$M(x_n) = \max[x \cdot V(\lambda) + (1-x) \cdot V'(\lambda)] \approx 1 - 0,65x + 0,65x^2 \quad \text{Formel 3-28}$$

Das vom TC1-58 entwickelte „Zwischen“-Modell stellt eine Zusammenfassung des X-Modells und des MOVE-Modells dar, wobei es galt, die Schwächen beider Modelle zu beseitigen. Für die Entwicklung des „Zwischen“-Modells wurden zwei verschiedene Möglichkeiten für die Grenzen des mesopischen Bereiches gewählt. Möglichkeit 1 wurde für die Grenzen $0,01 \text{ cd/m}^2$ und 3 cd/m^2 analysiert, Möglichkeit 2 für die Grenzen $0,005 \text{ cd/m}^2$ und 5 cd/m^2 . Des Weiteren wurde aufgrund der guten Übereinstimmung der berechneten Daten des MOVE-Modells mit den gesammelten Daten ein log-lineares Verhältnis zwischen der mesopischen Leuchtdichte und x gewählt. Zudem wurde auch die Anwendbarkeit des Modells für das periphere Sehen im mesopischen Bereich berücksichtigt. In den folgenden drei Formeln sind die mathematischen Zusammenhänge dieses Modells dargestellt. Der Faktor m und die mesopische Leuchtdichte (L_{mes}) müssen dabei iterativ bestimmt werden. Auch in diesem Modell wird $V_{mes}(\lambda)$ anhand einer leicht abgewandelten Form der Formel 3-22 berechnet. Diese kleine Veränderung (Faktor $M(m)$) wurde eingeführt, damit $V_{mes}(\lambda)$ einen Maximalwert von 1 erreicht. [CIE, 2009]

$$M(m) \cdot V_{mes}(\lambda) = m \cdot V(\lambda) + (1-m) \cdot V'(\lambda) \quad \text{Formel 3-29}$$

mit : $m = 1$ bei $L_{mes} \geq 5,0 \text{ cd/m}^2$

$m = 0$ bei $L_{mes} \leq 0,005 \text{ cd/m}^2$

$$L_{mes,n} = [m_{(n-1)} \cdot L_P + (1 - m_{(n-1)}) \cdot L_S \cdot V'(\lambda_0)]/[m_{(n-1)} + (1 - m_{(n-1)}) \cdot V'(\lambda_0)] \quad \text{Formel 3-30}$$

$$m_{(n)} = a + b \cdot \log_{10}(L_{mes,n}) \quad \text{Formel 3-31}$$

mit : $a = 0,7670$ und $b = 0,3334$

$m_0 = 0,5$ und $n = \text{Iterationsschritt}$

Anhand zahlreicher Tests der vier Modelle mithilfe unabhängiger Datensätze wurde deutlich, dass das „Zwischen“-Modell mit den Grenzen $0,005 \text{ cd/m}^2$ und 5 cd/m^2 das am meisten geeignete Modell für das periphere Sehen darstellt. Für foveales Sehen und sehr kleine Objekte hingegen kann auch im mesopischen Bereich die $V(\lambda)$ -Funktion gewählt werden, da das Sehen in diesem Bereich der Netzhaut über die Zapfen erfolgt. Das Modell liefert allerdings keine guten Ergebnisse bei beispielsweise hoher Farbsättigung, wobei in diesem Fall die Anwendung von $V(\lambda)$ nicht empfohlen wird. [CIE, 2009]

3.4.3.4 Zusammenfassung

Es wurde deutlich, dass das Sehen im mesopischen Bereich ein sehr komplexer Vorgang ist. Sowohl die Stäbchen als auch die Zapfen sind aktiv, wobei die Stärke ihrer Aktivität von der vorherrschenden Leuchtdichte abhängt. Je „heller“ das Umfeld, desto aktiver sind die Zapfen; je dunkler das Umfeld, desto aktiver sind die Stäbchen. Demnach wird nicht nur von einer Wechselwirkung zwischen den verschiedenen Zapfentypen sondern auch einer Zapfen-Stäbchen-Wechselwirkung ausgegangen. Die für den mesopischen Bereich geltenden zwei Effekte, der Purkinje-Effekt und der Helmholtz-Kohlrausch-Effekt, wurden beschrieben.

Die für den mesopischen Bereich bekannten Modelle lassen sich aufgrund ihrer sehr unterschiedlichen Anschauungen und Grundlagen in zwei Gruppen untergliedern. Gruppe 1 sind die so genannten mesopischen Helligkeitsmodelle. Seit Beginn der 1950er Jahre wurden diese Modelle entwickelt. Sie beruhen auf Helligkeitsbewertungsuntersuchungen. Dabei wurde die Helligkeit eines Testfeldes mit dem eines Referenzfeldes verglichen. Das neueste Modell ist das Helligkeitsmodell nach SAGAWA (2006), welches neueste Erkenntnisse miteinander verknüpft. Derzeit wird es noch von verschiedenen Gremien geprüft und es wird davon ausgegangen, dass dieses Modell von der CIE empfohlen wird. Gruppe 2 sind die so genannten mesopischen Sehleistungsmodelle. Zum Ende des 20. Jahrhunderts wurden diese Modelle erstmals entwickelt. Sie beruhen auf Daten, die bei der Erfüllung der Sehaufgabe erzeugt wurden und spiegeln demnach die Realität besser wider. Denn beim Fahren eines Fahrzeugs ist das Wahrnehmen und Erkennen von Objekten relevanter als die Bewertung ihrer Helligkeit. Das X-Modell, das MOVE-Modell sowie zwei Ausführungen des „Zwischen“-Modells wurden auf die Anwendbarkeit im peripheren Bereich geprüft. Das „Zwischen“-Modell mit den Grenzen $0,005 \text{ cd/m}^2$ und 5 cd/m^2 ist das am meisten geeignete Modell für das periphere Sehen. Für foveales Sehen und sehr kleine Objekte hingegen empfiehlt sich auch im mesopischen Bereich die $V(\lambda)$ -Funktion zur Bestimmung der Hellempfindlichkeit zu wählen.

3.5 Der Prozess des Erkennens

3.5.1 Überblick

Der Prozess des Erkennens umfasst die Identifizierung einer optischen Information mit einem Erinnerungsbild/ dem Gedächtnis. [GRAMBERG-DANIELSEN ET AL., 1984]

Das Erkennen ist ein sehr komplexer Vorgang, der die Wahrnehmung verschiedener Objekteigenschaften voraussetzt. Dabei bedient sich der Mensch bestimmten Regeln, die als Gestaltfaktoren bekannt und definiert sind. Je nach dem, welche Sehaufgabe vorliegt, werden verschiedene Objekte erkannt oder nicht. Um ein Objekt zu erkennen und schließlich deren Beziehung zu Gedächtnisinhalten oder auch Handlungsmöglichkeiten aufzustellen, müssen sowohl allgemeine Informationen, wie beispielsweise Ort, Form und Farbe verarbeitet werden, als auch spezielle Details, wie beispielsweise Texturen. (vgl. Anhang, Kapitel A3)

Dieser Prozess wird bereits seit vielen Jahrzehnten im Fachbereich Psychologie ausführlich analysiert und erforscht. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher nicht näher darauf eingegangen.

3.5.2 Die Gestaltfaktoren

Nach den Gestaltpsychologen existieren insgesamt neun Regeln, nach denen der Mensch die einzelnen Teile zu einem Ganzen zusammenfügt. Im Folgenden werden diese Regeln nach GOLDSTEIN (2002) kurz beschrieben, eine ausführliche Dokumentation mit Beispielen befindet sich im Anhang, Kapitel A3.

1. Faktor der Prägnanz / der guten Gestalt / der Einfachheit

„Jedes Reizmuster wird so gesehen, dass die resultierende Struktur so einfach wie möglich ist.“

2. Faktor der Ähnlichkeit

„Ähnliche Dinge erscheinen zu zusammengehörenden Gruppen geordnet.“

3. Faktor der gestaltgerechten Linienfortsetzung

„Punkte, die als gerade oder sanft geschwungene Linien gesehen werden, wenn man sie verbindet, werden als zusammengehörig wahrgenommen. Linien werden tendenziell so gesehen, als folgten sie dem einfachsten Weg.“

4. Faktor der Nähe

„Dinge, die sich nahe beieinander befinden, erscheinen als zusammengehörig.“

5. Faktor des gemeinsamen Schicksals

„Dinge die sich in die gleiche Richtung bewegen, erscheinen als zusammengehörig.“

6. Faktor der Bedeutung oder Vertrautheit

„Dinge bilden mit größerer Wahrscheinlichkeit Gruppen, wenn Gruppen vertraut erscheinen oder etwas bedeuten.“

7. Faktor der gemeinsamen Region

„Elemente, die innerhalb einer gemeinsamen Region liegen, werden zusammengruppiert.“

8. Faktor der Verbundenheit der Elemente

„Elemente, die miteinander verbunden sind, werden als Einheit gesehen.“

9. Faktor der zeitlichen Synchronizität

„Leuchtpunkte, die gemeinsam aufleuchten, werden als eine Einheit erkannt.“

3.6 Das Blickverhalten

3.6.1 Überblick

Das Blickverhalten oder auch Fixationsverhalten beschreibt die Augenbewegungen des Fahrers, die er während des Führens eines Fahrzeugs durchführt. SCHWEIGERT (2003) unterscheidet die Blickbewegungen in willkürliche und unwillkürliche Blickbewegungen. Bei willkürlichen oder auch gesteuerten Blickbewegungen wird das Fixationsziel willentlich festgelegt. Demnach ist diese Art der Blickbewegung ein Ergebnis von Top-Down-Prozessen. Als Beispiel nennt er die Blickbewegungen an einer Rechts-vor-Links-Situation. Der Fahrer blickt willentlich nach rechts, um sich

zu vergewissern, ob ein Fahrzeug von rechts kommt oder nicht. Bei unwillkürlichen oder auch getriggerten Blickbewegungen ist das Fixationsziel nicht festgelegt sondern wird durch so genannte Schlüsselreize bestimmt. Zu diesen Schlüsselreizen gehören beispielsweise aufblinkende Symbole im Fahrzeug, die die Aufmerksamkeit auf sich ziehen und fixiert werden. Diese Art der Blickbewegung ist ein Ergebnis von Bottom-Up-Prozessen und kann kaum unterdrückt werden.

Da beide Arten der Blickbewegung beim Führen eines Fahrzeugs auftreten, werden auch beide im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigt. Zum Einen die gesteuerten Blickbewegungen, welche der strategischen Orientierung des Fahrers im Straßenraum dienen und zum Anderen die getriggerten Blickbewegungen, die für die Untersuchung der Auffälligkeit von Objekten im Straßenraum wesentlich sind. Bei ausreichender Auffälligkeit löst ein Objekt, welches im peripheren Netzhautbereich abgebildet wird, eine reflektorische Blickbewegung aus. Das Objekt wird in den Bereich des schärfsten Sehens „gerückt“ und fixiert. Somit können die Informationen des Objektes aufgenommen und schließlich weiterverarbeitet werden.

3.6.2 Fixationen und Saccaden

Das Blickverhalten ist ein Wechselspiel zwischen Fixationen und Saccaden. Während der Fixation befindet sich das Auge in relativem Stillstand, sehr kleine Augenbewegungen wie beispielsweise der Tremor⁴ werden vernachlässigt. Nur in dieser Zeit können visuelle Informationen aufgenommen und verarbeitet werden. Nach GAARDER (1975) (in [BERGER, 1993]) ist bei der Auswertung des Blickverhaltens jedoch zu beachten, dass es nicht sicher ist, ob der Proband die Stelle, die er gerade fixiert wahrnimmt, anstarrt oder ob er seine Aufmerksamkeit dem peripheren Bereich zuwendet.

Die Dauer einer Fixation ist abhängig von der Anforderung der jeweiligen Aufgabe und wird häufig mit der Dauer der Informationsverarbeitung in Verbindung gebracht. Nach RAYNER (1978, 1998) (in [PANNASCH, 2003]) kann beispielsweise beim Lesen eine durchschnittliche Fixationsdauer von 225 ms, bei visuellen Suchaufgaben von ca. 275 ms und bei Bildwahrnehmungen von rund 330 ms angenommen werden.

Saccaden sind sehr schnelle Augenbewegungen, die Geschwindigkeiten von bis zu 900°/s erreichen können, wobei sie nur 10 bis 80 ms andauern. Sie treten zwischen zwei Fixationen auf und „transportieren“ den Ort des schärfsten Sehens von einem Objekt zum nächsten, dabei können Blickwinkel von 2 bis 50° erreicht werden. ([PANNASCH, 2003], [FRITSCHER, 2005])

Für das Blickverhalten während einer Autofahrt kann angenommen werden, dass etwa drei Objekte pro Sekunde fixiert werden, wobei die mittlere Fixationsdauer in etwa 330 ms andauert. Demnach werden zwei Saccaden pro Sekunde ausgeführt. (HÖFNER und HOSKOVEC (1973) in [DIEM, 2004], [COHEN, 1987a]) Nach BUBB (2000) und SCHWEIGERT (2003) können im Straßenverkehr Fixationszeiten von 80 bis 100 ms bis zu einigen Sekunden auftreten. Dabei können sich nach YARBUS (1967) (in [BERGER, 1993]) Monotonie, Langeweile oder auch Ermüdung verlängernd auswirken. Für kürzere Zeiten, als die angegebene Schwelle (80 bis 100 ms), können

⁴ Hochfrequentierte Zitterbewegungen, ständig Abbildung auf anderen Netzhautbereichen, nur so ist Betrachten über längere Zeit möglich [DIEM, 2004]

die Informationen nicht bewusst verarbeitet werden. (YOUNG ET AL. (1975) in [SCHWEIGERT, 2003], [BUBB, 2000])

Der Unterschied des Blickverhaltens in statischen und dynamischen Umfeldern besteht darin, dass in dynamischen Umfeldern neben den Saccaden und Fixationen auch Folgebewegungen⁵ der Augen zu verzeichnen sind. [PANNASCH, 2003]

3.6.3 Ein Modell des Blickverhaltens

Nach SCHWEIGERT (2003) kann eine Vorhersage des Blickverhaltens nur unter bestimmten Voraussetzungen getroffen werden. In der Literatur existieren verschiedene Modelle, die das Blickverhalten beschreiben, wobei diese Modelle zum Teil nur für bestimmte Situationen gelten. Es gibt kein festgelegtes Blickverhalten der Autofahrer. Hingegen kann davon ausgegangen werden, dass für eine Verkehrssituation verschiedene Blickverhaltensweisen existieren. Nach COHEN und HIRSING (1990) (in [SCHWEIGERT, 2003]) gleichen sich bei hoher Anforderung durch die Fahraufgabe und vollem Einsatz der visuellen Kapazität für die Aufnahme relevanter Informationen die Informationsaufnahmемuster an. Ergo können in besonders komplexen Fahrsituationen ähnliche Muster der Blickbewegung beobachtet werden.

In Bild 3-9 ist ein allgemeines Modell des Blickverhaltens von GENGEBACH (1999) (in [SCHWEIGERT, 2003]) dargestellt. Demnach scannt der Fahrer die vor ihm liegende Verkehrssituation nach Informationen ab. Dabei kann von 0,8 bis fünf Fixationen pro Sekunde ausgegangen werden. Die Größe des abgescannten Bereiches wird von verschiedenen Parametern beeinflusst, diese werden in Kapitel 4 ausführlicher beschrieben. Dieser Bereich wird im Folgenden Fixationsbereich genannt. Ist ein Objekt aufgrund seiner Eigenschaften besonders auffällig und zieht damit Aufmerksamkeit auf sich, wird eine unwillkürliche Blickbewegungssaccade ausgeführt und dieses Objekt wird fixiert. Die Dauer der Fixation hängt dabei vom Informationsgehalt des Objektes ab bzw. wird bei benötigten Blicken zur Führung des Fahrzeugs (Bahnführung) oder zur Beobachtung des Vorfeldes beschränkt.

⁵ Stabilisation eines bewegten Objektes oder des Hintergrundes bei eigener Bewegung [DIEM, 2004]

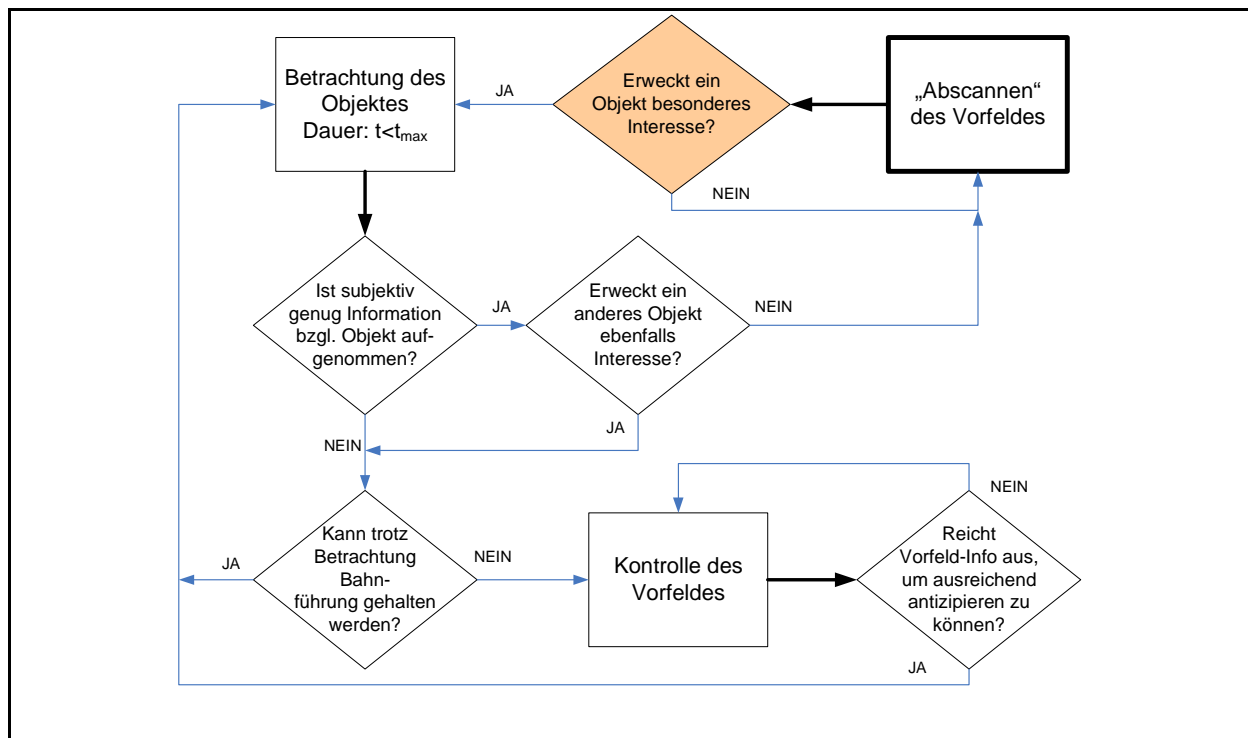


Bild 3-9: Ein Modell zur Beschreibung des Blickverhaltens (GENGENBACH, 1999 in [SCHWEIGERT, 2003])

3.6.4 Das Fixationsverhalten der Fahrer auf Verkehrszeichen

DIEM (2004) untersuchte im Rahmen seiner Dissertation, in welchen Entfernungen und wie lange Verkehrszeichen im Straßenraum fixiert werden. Dabei machte er allerdings keine Angaben über das Umfeld, in dem sich die Verkehrszeichen befinden, so dass keine Aussagen zum Ablenkungseffekt nicht-relevanter Informationen getroffen werden können. Zur Untersuchung des Blickverhaltens wurden die Fixationsentfernung und die Fixationszeit auf drei Straßenklassen (Stadtstraße, Landstraße und Autobahn bzw. autobahnähnliche Straßen) in Abhängigkeit von der Art des Verkehrsschildes gemessen. Folgende Ergebnisse konnten ermittelt werden: Am Tag werden nur 20 bis 25% der Verkehrszeichen fixiert, bei Dunkelheit reduziert sich dieser geringe Anteil weiter auf unter 10%, mit zunehmender Wiederholung der Verkehrszeichen nimmt die Häufigkeit und die Zeit der Fixationen ab, begründbar mit der Abnahme der Auffälligkeit des Verkehrszeichens. Am Tag liegt die mittlere Fixationszeit bei ungefähr 0,34 s, bei Dunkelheit bei ungefähr 0,24 s. Unter Berücksichtigung der verringerten Bewegungsgeschwindigkeit der Augen bei Dunkelheit und der daraus resultierenden längeren Zeit der Abbildung des Objektes im fovealen Bereich (obwohl sich die Augen noch bewegen), konnte eine mittlere Abbildungszeit für den Tag von ungefähr 0,5 s ermittelt werden, bei Dunkelheit liegt dieser Wert bei ungefähr 1,0 s. Im Gegensatz zu den Vorschriftzeichen werden die Richtzeichen und die wegweisende Beschilderung am Tag doppelt so lang fixiert. Da die wegweisende Beschilderung sehr viel komplexer ist als die Richtzeichen bzw. Gefahrenzeichen, ist dieses Ergebnis für die wegweisende Beschilderung nachvollziehbar. Weshalb jedoch die Richtzeichen so lang fixiert werden, konnte im Rahmen der Untersuchungen nicht geklärt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass aufgrund der geringeren

Fixationsrate von Verkehrszeichen bei Dunkelheit keine statistisch gesicherten Angaben vorliegen.

Auch SCHNEIDER ET AL. (1995) untersuchten die Wahrnehmung von Verkehrszeichen jedoch ausschließlich bei Tag. Anhand von Blickverhaltensuntersuchungen konnten folgende Ergebnisse erzielt werden:

- Im Gegensatz zu DIEM (2004) konnten sie nachweisen, dass auf einer unbekannten Strecke (1. Fahrt) rund 77% der Verkehrszeichen von Fahranfängern sowie 63% von erfahrenen Fahrern foveal fixiert wurden. War die Strecke bekannt (2. Fahrt), wurden von Fahranfängern nur noch 65%, von erfahrenen Fahrern nur noch 56% der Verkehrszeichen fixiert.
- Auf einer unbekannten Strecke (1. Fahrt) fixierten Fahranfänger Lichtsignalanlagen (LSA), Ortstafeln und Ortshinweistafeln länger als erfahrene Fahrer. Zudem traten erhebliche interpersonelle Streuungen auf, welche auf die Individualität der Versuchspersonen zurückzuführen waren. Für komplexe Verkehrszeichen, wie beispielsweise Wegweiser, ergaben sich längere Fixationszeiten, wobei diese bei den Fahranfängern kürzer waren. Im Vergleich dazu sank die Anzahl der Blicke innerhalb der 2. Fahrt. Die Fixationszeiten sowie die Streuungen bei den Anfängern waren im Vergleich zur 1. Fahrt niedriger. Diese Entwicklung lässt auf den verfügbaren Erinnerungsgehalt und somit auf ein homogeneres Blickverhalten schließen. Hinsichtlich der erfahrenen Fahrer lassen sich allerdings keine allgemeinen Aussagen treffen. Nach Aussage der Autoren stehen die längeren Fixationszeiten bei den erfahrenen Fahrern mit dem höheren Lebensalter in Zusammenhang.
- Von den Fahrern wurde am häufigsten das vorausfahrende Fahrzeug (36%) foveal fixiert. Insbesondere die Anfänger blickten auf unbekannten Strecken auch nicht-relevante Objekte, wie beispielsweise Werbetafeln an. Zudem wurden von allen Fahrern insbesondere der Gegenverkehr, der Straßenrand, parkende Fahrzeuge und die Fahrbahn foveal fixiert.

Zusammenfassend merken die Autoren an, dass die Fixation eines Verkehrszeichens nicht nur von der physikalischen Reizgrundlage abhängt, sondern auch von dessen Bedeutungsgehalt. Dieser Zusammenhang wurde insbesondere durch die Blickzuwendungen zu Straßennamensschildern deutlich. Waren diese zur Erfüllung der Fahraufgabe von Interesse, so wurden sie vermehrt fixiert, sonst nur sehr selten. Demnach kann davon ausgegangen werden, dass Verkehrszeichen nicht immer über foveale Fixation verarbeitet werden, sondern dass dies auch über den peripheren Bereich erfolgen kann. Nach Aussage der Autoren sind die Verkehrszeichen bei Tageslicht ausnahmslos sichtbar, erregen aber aufgrund der Umfeldbedingungen (Tag) keine reflexartige foveale Blickzuwendung. Für den Zustand Dunkelheit wird ein anderes Blickverhalten vorausgesagt. [SCHNEIDER ET AL., 1995]

3.7 Das Basismodell des Perception-Modells

In Bild 3-10 ist das Basismodell des Perception-Modells dargestellt, welches als Grundlage für die folgenden Recherchen und Untersuchungen dient. Das Modell basiert auf den im Voraus beschriebenen Teilmodellen Prozess des Sehens, Prozess des Wahrnehmens, Prozess des Erkennens sowie gesteuertes Blickverhalten und

getriggertes Blickverhalten. In Kapitel 4 werden die Einflussparameter sowie deren Auswirkungen auf die Teilmodelle des Perception-Modells beschrieben.

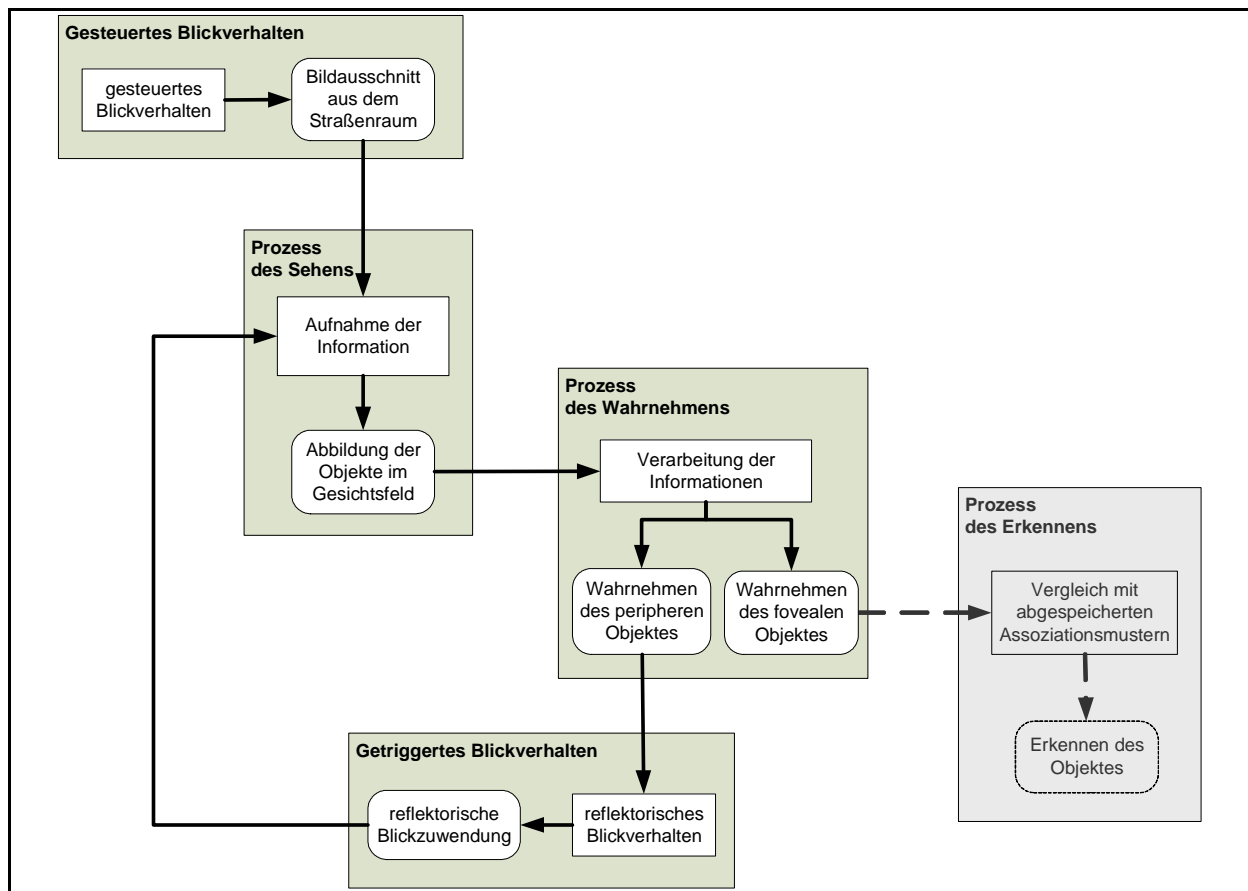


Bild 3-10: Basismodell des Perception-Modells

4 Beschreibung der Einflussparameter

4.1 Allgemeines

Auf den visuellen Wahrnehmungsvorgang wirkt eine Vielzahl von Einflussparametern ein. In den folgenden Kapiteln werden die wichtigsten Parameter näher beschrieben, die den folgenden Einflusskategorien zugeordnet werden:

- Umwelteinflüsse,
- Straßenspezifische Einflüsse,
- Verkehrsspezifische Einflüsse und
- Fahrerspezifische Einflüsse.

Zu den Umwelteinflüssen zählen in erster Linie die Umfeldhelligkeit sowie widrige Sichtverhältnisse, hervorgerufen durch Nebel oder Sonnenblendung. Den Straßenentwurf betreffende Parameter zählen zu den Straßenspezifischen Einflüssen. Dazu gehören der Querschnitt der Straße, die Lage der Straße und deren Linienführung. Die Verkehrsstärke und die gefahrene Geschwindigkeit werden der Kategorie Verkehrsspezifischen Einflüssen zugeordnet. Die Fahrerspezifischen Einflüsse werden im Rahmen dieser Arbeit in zwei Unterkategorien untergliedert, in die langfristig wirkenden Variablen und die kurzfristig wirkenden Variablen. Die Begründung für diese Untergliederung wird im folgenden Kapitel 4.2 beschrieben. Zu den langfristig wirkenden Variablen zählen das Geschlecht, das Alter und die Fahrerfahrung, zu den kurzfristig wirkenden Variablen die Beanspruchung/die Belastung und die Ermüdung. Einflüsse, die vom Fahrer selbst hervorgerufen werden, wie beispielsweise Veränderungen infolge Alkohol-, Drogen- oder Medikamentenkonsum, sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Zunächst wird jeder Parameter beschrieben und auf Grundlage der Erkenntnisse aus Kapitel 3 sowie aus dem Anhang, Kapitel A1, A2 und A3 werden Prognosen hinsichtlich seines Einflusses formuliert. Basierend auf einer umfassenden Literaturstudie wird der derzeitige Stand des Wissens dargestellt. In der Zusammenfassung werden die wichtigsten Ergebnisse aus der Literatur und weitere zu untersuchende Gesichtspunkte beschrieben.

4.2 Die Untergliederung der fahrerspezifischen Einflüsse

Nach ROHMERT (1983) (in [ABENDROTH, 2001]) wird der Fahrer nach seinen Eigenschaften, seinen Fähigkeiten und seinen Fertigkeiten charakterisiert. Unter den Fahrereigenschaften werden „intraindividuell weitgehend zeitunabhängige Einflussgrößen“ verstanden, die sich nur innerhalb sehr großer Zeiträume verändern. Zu den relevantesten Eigenschaften im Bereich des Autofahrens zählen das Geschlecht, das Alter sowie verschiedene Persönlichkeitsmerkmale. Unter Fähigkeiten werden „intraindividuell zeitabhängige kurz- bzw. langfristige Änderungen“ verstanden. Darunter zählen beispielsweise die Ermüdung und die Aufmerksamkeit. „Unter Fertigkeiten werden Arbeitsfunktionen verstanden, die sowohl durch menschliche Grundfunktionen als auch durch den konkreten Gestaltungszustand der Arbeitsaufgabe und der Arbeitsumgebung bedingt sind.“ Zu

den relevantesten Fertigkeiten im Bereich des Autofahrens zählen die Fahrerfahrung und der Fahrstil.

COHEN (1986) unterscheidet die Eigenschaften des Fahrers hingegen in langfristig wirkende Variablen und in kurzfristig wirkende Variablen. Langfristig wirkende Variablen sind konstante Merkmale des Fahrers, die auch über längere Zeit unverändert bleiben bzw. sich nur äußerst langsam verändern. Dazu zählen beispielsweise Geschlecht, Alter, Fahrerfahrung und Risikobereitschaft. Kurzfristig wirkende Variablen hingegen umfassen die Einflussgrößen, die zeitlich begrenzt auftreten, sie werden auch als situative Variablen bezeichnet. Dazu zählen beispielsweise Beanspruchung, Verarbeitungskapazität, Ermüdung und Einfluss von Alkohol.

Beim Vergleich dieser beiden Definitionen werden nur geringe Unterschiede deutlich. COHEN (1986) fasst die Eigenschaften und die Fertigkeiten des Fahrers in der Gruppe der langfristig wirkenden Variablen zusammen. Die Fähigkeiten des Fahrers, die als intraindividuell zeitabhängige kurz- bzw. langfristige Änderungen bezeichnet werden, benennt er als kurzfristig wirkende Variablen. Für die Bearbeitung des Perception-Modells wird die Untergliederung in langfristig und kurzfristig wirkende Variablen nach COHEN (1986) gewählt.

4.3 Umwelteinflüsse

4.3.1 Umfeldhelligkeit

4.3.1.1 Allgemeines und Prognosen

Unter Umfeldhelligkeit wird im Rahmen dieser Arbeit die Helligkeit des Straßenumfeldes, abhängig von der Tageszeit, verstanden. Dabei wird in zwei verschiedene Zustände unterschieden. Zum Einen wird der Beleuchtungszustand Tag, zum Anderen der Beleuchtungszustand Dunkelheit betrachtet. Bei Dunkelheit wird hierbei von einer Beleuchtung durch künstliches Licht (Scheinwerfer, Straßenbeleuchtung, etc.) ausgegangen, so dass nicht von Dunkelheit im „klassischen Sinn“ gesprochen werden kann. Nach LACHENMAYR ET AL. (1996) spielt sich der „nächtliche Straßenverkehr [...] im mesopischen Bereich mit einer durchschnittlichen Adaptations-leuchtdichte von 0,1 cd/m² ab“. (vgl. auch [SCHMIDT-CLAUSEN und FREIDING, 2004])

Aufgrund des Aufbaus der menschlichen Netzhaut und der damit verbundenen Verteilung der Photorezeptoren kann bei Dunkelheit von einer Verschlechterung der Sehleistung (beispielsweise Sehschärfe, Kontrastempfindlichkeit) ausgegangen werden. Des Weiteren können bei Dunkelheit über das periphere Sehen aufgrund der niedrigeren Kontraste und aufgrund der teilweise sehr unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnisse weniger Informationen aufgenommen werden.

Durch die fahrzeugeigene Beleuchtung (Abblendlicht) wird nur ein verhältnismäßig kleiner Raum der Straße ausgeleuchtet. Nach KUHLE (2006) wird die Lichtverteilung des Abblendlichtes durch die Hell-Dunkel-Grenze in den oberen und den unteren Bereich unterteilt. In den oberen Bereich gelangt nur Streulicht (keine Blendung der entgegenkommenden Fahrzeuge), der untere Bereich ist hell erleuchtet. Dabei sinkt die Hell-Dunkel-Grenze mit zunehmender Entfernung vom Scheinwerfer und schneidet in einer Entfernung von 40 bis 70 m die Fahrbahnoberfläche. Des Weiteren

ist das europäische Abblendlicht (ausgenommen das adaptive Kurvenlicht) asymmetrisch verteilt. Der rechte Bereich des eigenen Fahrstreifens (auf Geraden) wird stärker ausgeleuchtet als der des entgegenkommenden Verkehrs. Insbesondere in Kurven wird diese Tatsache Auswirkungen zeigen. (vgl. Bild 4-1) Demnach kann angenommen werden, dass sich hinsichtlich des gesteuerten Blickverhaltens die Fixationsentfernung bei Dunkelheit bzw. unter künstlicher Beleuchtung durch die fahrzeugeigenen Scheinwerfer verkürzt sowie dass sich der Bereich der Fixationen insbesondere in Kurven verlagert. Zudem muss der Fahrer einen größeren Bereich des Straßenraums fixieren, um die wichtigen Informationen aufnehmen zu können.

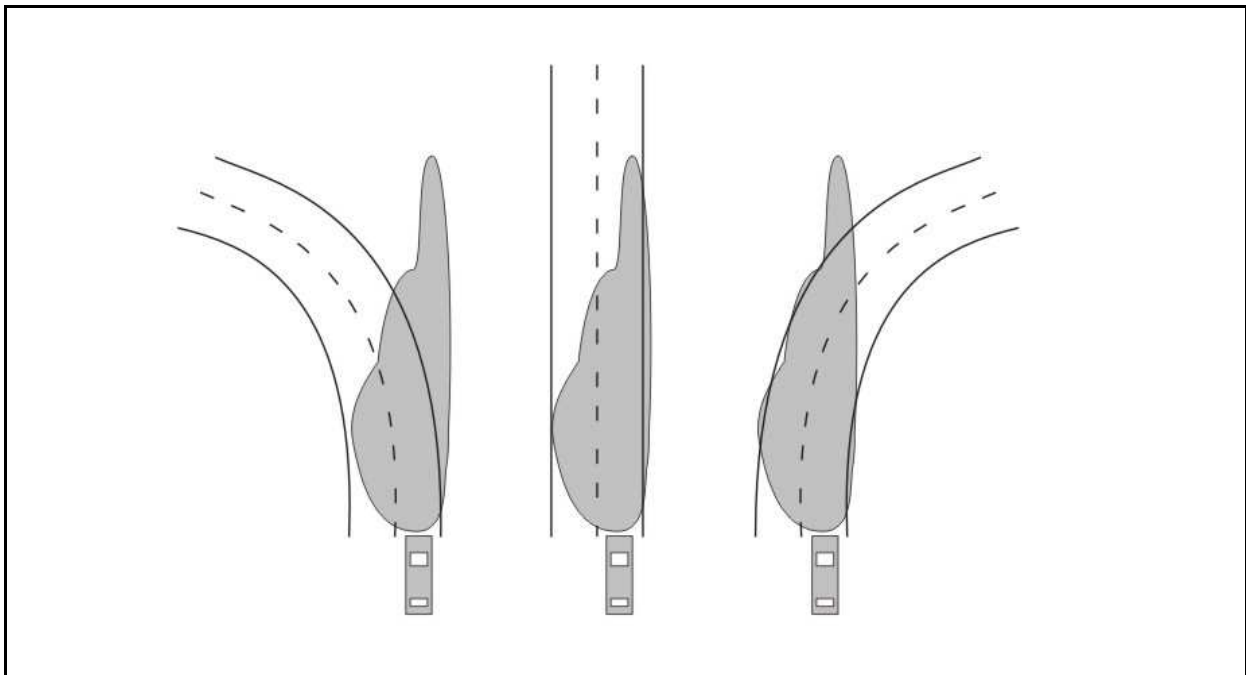


Bild 4-1: Schematische Darstellung des Abblendlichtes in Kurven und Geraden [Kuhl, 2006]

Aufgrund der eingeschränkten Sehleistung insbesondere im peripheren Bereich ist davon auszugehen, dass Objektkontraste, die unterhalb des gestiegenen Schwellenkontrast liegen, keinen Schlüsselreiz und somit keine reflektorische Blickbewegung auslösen. Die Informationen dieser Objekte können somit nicht wahrgenommen und fixiert werden und gehen dem Fahrer verloren.

Außerdem kann für einen normal arbeitenden Menschen (keine Schichtarbeiter) von einem Schlaf-Wach-Rhythmus ausgegangen werden, der an die Tageszeiten und somit auch an die Umfeldhelligkeit gekoppelt ist. Während dieser Zeiten verändert sich auch die Leistungsfähigkeit des Menschen. Es wird angenommen, dass Leistungsgengpässe in der Informationsaufnahme und Informationsverarbeitung beispielsweise aufgrund des Biorhythmus insbesondere in Zeiten mit geringer Umfeldhelligkeit auftreten.

4.3.1.2 Ergebnisse aus der Literatur

Der Einfluss auf das gesteuerte Blickverhalten, insbesondere die Verschiebung der Lage des fixierten Bereiches bei Dunkelheit, konnte in verschiedenen Untersuchungen nachgewiesen werden. Nach MORTIMER und JORGESON (1974) (in [COHEN, 1986]) häufen sich bei Nachtfahrten die Fixationen im Bereich des eigenen Fahrstreifens, bei Tag sind sie weiter verstreut. Nach DIEM (2004) verlagern sich auf

Landstraßen, ausgenommen in Rechtskurven, die Häufigkeitsbereiche der Fixationen bei Dunkelheit in die Mitte der Fahrbahn. In Rechtskurven hingegen verschiebt sich der Fixationsschwerpunkt zum rechten Fahrbahnrand bzw. zu beiden Fahrbahnrändern. Diese Entwicklung lässt sich auf die Ausleuchtung des Straßenraumes infolge fahrzeugeigener Beleuchtung zurückführen. (vgl. Bild 4-1) In Tabelle 4.1 ist die Lage der Fixationsbereiche auf Landstraßen in Abhängigkeit von der Umfeldhelligkeit und der Linienführung zusammengefasst.

Linienführung	Tag	Dunkelheit
Gerade	rechter Fahrbahnrand	Fahrstreifenmitte
Linkskurve	rechter Fahrbahnrand	Fahrbahnmitte
Enge Linkskurve	linker Fahrbahnrand	Fahrbahnmitte
Rechtskurve	gesamte Fahrbahn	rechter Fahrbahnrand
Enge Rechtskurve	rechter Fahrbahnrand	linker und rechter Fahrbahnrand

Tabelle 4.1: Lage der Fixationsbereiche in Abhängigkeit von Umfeldhelligkeit und Linienführung auf Landstraßen [DIEM, 2004]

Auch die Veränderung der Fixationsentfernung mit zunehmender Dunkelheit konnte nachgewiesen werden. Nach HEINRICH (1985) und MORTIMER und JORGESON (1974) (beide in [COHEN, 1986]) verkürzt sich mit zunehmender Dunkelheit die Fixationsentfernung. Auch DIEM (2004) konnte in seinen Untersuchungen diesen Einfluss aufzeigen, wobei er einen zusätzlichen Einfluss der Linienführung erkannte. Demnach ist die Verkürzung der Fixationsentfernung in Linkskurven (~64%) am größten und in Geraden (~17%) am geringsten. In Rechtskurven sowie engen Kurven (Recht- und Linkskurven) ist von einer Verkürzung von bis zu 35% auszugehen.

Des Weiteren konnte DIEM (2004) auch die Veränderung der Größe des Fixationsbereiches nachweisen. Der Bereich der häufigsten Fixationen auf Stadtstraßen und geraden Landstraßenabschnitten (vgl. Bild 4-2) ist bei Dunkelheit (rechts) größer als am Tag (links). Bei Fahrten auf Autobahnen bzw. autobahnähnliche Straßen konnte beobachtet werden, dass sich bei Dunkelheit zum Einen die Fixationsbereiche vergrößern und zum Anderen die beiden rechten Fixationsbereiche vermischen.

Zudem konnte DIEM (2004) nachweisen, dass auch die Reflexionseigenschaft der Fahrbahnoberfläche das gesteuerte Blickverhalten bei Nacht beeinflusst. Bei Fahrten auf dunklen Fahrbahnoberflächen (Asphalt) ist die Fixationsfläche größer und über den gesamten Fahrbahnquerschnitt verteilt, bei Fahrten auf hellen Fahrbahnoberflächen (Beton) ist die Fixationsfläche hingegen wesentlich kleiner und auf die Mitte des eigenen Fahrstreifens konzentriert.

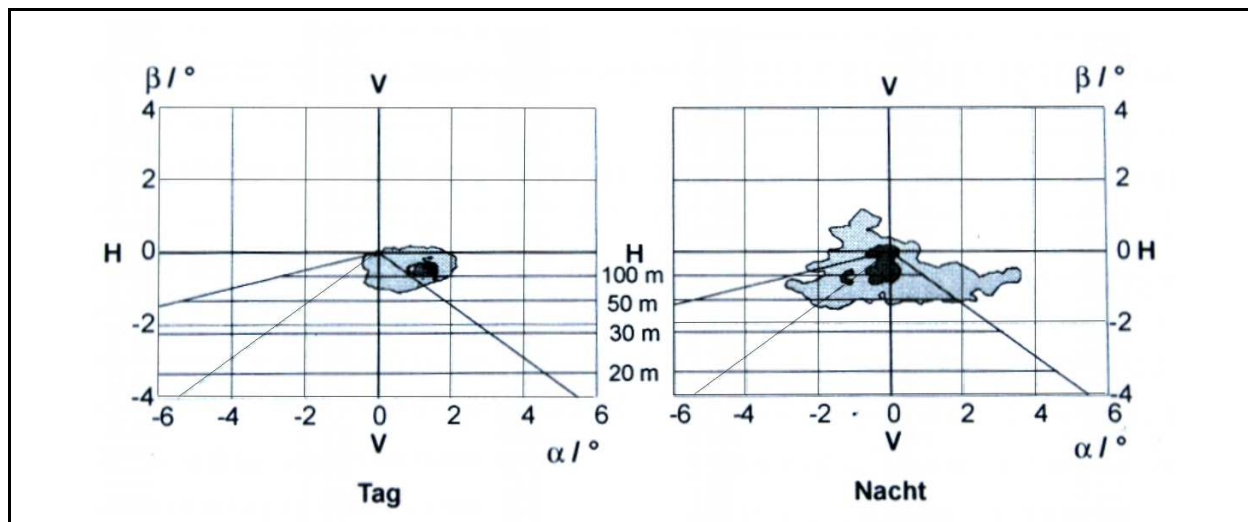


Bild 4-2: Darstellung der Fixationsbereiche auf geraden Landstraßenabschnitten bei Tag (links) und Dunkelheit (rechts) [DIEM, 2004]

Der Einfluss der Umfeldhelligkeit auf den Prozess des Sehens wurde in zahlreichen Studien untersucht. Aufgrund der Adaptationsfähigkeit der Augen kann der Mensch sowohl bei Sonnenlicht als auch bei Mondlicht sehen. Das Sehvermögen steigt mit zunehmendem Beleuchtungsniveau an, kleinere Details werden erkennbar und geringere Kontraste wahrnehmbar. Zudem kann bei einem höheren Beleuchtungsniveau auch von einer höheren Wahrnehmungsgeschwindigkeit ausgegangen werden. Dies ist mit der Verteilung der Photorezeptoren auf der Netzhaut zu begründen. (vgl. Anhang, Kapitel A1) Nach WÖRDENWEBER (2008) sinkt die Sehschärfe einer normalsichtigen Person von 1,0 bei Tageslicht auf einen Wert von 0,2 bei Dunkelheit. LACHENMAYR ET AL. (1996) geben für den Übergang von Tageslicht zur Dämmerung eine Abnahme von 50% an, AULHORN (1987) sogar von bis zu 90%. Nach HARTMANN (1981) sinkt „das Sehvermögen im nächtlichen Straßenverkehr bis auf ein Zwanzigstel des Tageswertes“. Aufgrund der Abnahme der Sehschärfe können somit bei Dämmerung oder Dunkelheit verschiedene Objekte nicht mehr scharf abgebildet werden. Nach HEINRICH (1987) kann ein Objekt, welches mit einer Sehschärfe von 1,0 in einer Entfernung von 100 m erkannt wird, mit einer Sehschärfe von 0,5 erst ab 50 m erkannt werden.

Die Umfeldhelligkeit und die damit verbundene Tageszeit nehmen zudem Einfluss auf den Zustand des Wachseins des Menschen. Die Schlafforschung geht davon aus, dass der Mensch gegen 12.00 Uhr im Mittel am wachsten ist. Nach MONK (1991) (in [REITTER, 2001]) kann die Wachheit auch als Funktion der Dauer des Wachseins beschrieben werden. Demnach benötigen die Menschen vier bis sieben Stunden, um den individuellen Höhepunkt der Wachheit zu erlangen. Aus verschiedenen Unfalluntersuchungen ist bekannt, dass die Zahl der Einschlafunfälle sowohl bei Nacht (3.00 Uhr) als auch nachmittags (15.00 Uhr) einen Höhepunkt aufweisen. Diese „Wachheit“ des Menschen nimmt Einfluss auf die so genannte Überleitzeit. Darunter wird die Zeitdauer verstanden, die die visuellen Informationen von der Netzhaut zum Gehirn benötigen. [REITTER, 2001] Im mesopischen Sehbereich sind die Überleitzeiten länger als im photopischen Bereich. [GRAMBERG-DANIELSEN ET AL., 1984] Auch MORTIMER und JORGESON (1974) (in [COHEN, 1986]) konnten diese Entwicklung beobachten. Demnach verlängern sich bei Dunkelheit die mittleren Fixationszeiten im Vergleich zum Tag. Es wird vermutet, dass die Fahrer die

Informationen aus der Umwelt bei Dunkelheit nur verlangsamt „extrahieren“ konnten. KHANH (2004b) berichtet, dass die Umfeldhelligkeit Einfluss auf den Biorhythmus nimmt der auch die Leistungsfähigkeit des Menschen bestimmt. Die Begründung liegt in einem dritten Photorezeptortyp der Netzhaut, der Anfang der 2000er Jahre entdeckt wurde. In diesem Rezeptor wird die einfallende Strahlung im Photopigment Melanopsin absorbiert und in elektrische Impulse umgewandelt. Über eigene Bahnen gelangen diese Impulse in die Hirnareale, die die „biologische Uhr des Gehirns“ darstellen.

4.3.1.3 Zusammenfassung

Aus den Ergebnissen der verschiedenen Untersuchungen wird deutlich, dass die Umfeldhelligkeit einen großen Einfluss auf das gesteuerte Blickverhalten, den Prozess des Sehens sowie den Prozess des Wahrnehmens ausübt. Hinsichtlich des gesteuerten Blickverhaltens konnte ermittelt werden, dass die Lage, die Entfernung sowie die Größe des fixierten Bereiches in Abhängigkeit von der Umfeldhelligkeit stehen. Mit abnehmender Helligkeit verlagert und vergrößert sich der fixierte Bereich und verkürzt sich die Fixationsentfernung. Bei Geraden und Linkskurven verlagern sich die fixierten Bereiche bei Dunkelheit in die Mitte des eigenen Fahrstreifens bzw. der eigenen Fahrbahn, bei Rechtskurven wird vermehrt der Bereich des rechten Fahrbahnrandes fixiert. Des Weiteren konnte nachgewiesen werden, dass bei Dunkelheit die Verkürzung der Fixationsentfernung in Linkskurven größer ist als in Rechtskurven oder in Geraden. Diese Entwicklung lässt sich auf die veränderten Beleuchtungsverhältnisse infolge fahrzeugeigener Beleuchtung zurückführen. Aufgrund der Tatsache, dass bei Dunkelheit weniger Informationen über das periphere Sehen aufgenommen werden können, verändert sich die Größe des fixierten Bereiches mit abnehmender Helligkeit. Es muss ein größerer Bereich fixiert werden, um alle notwendigen Informationen aufnehmen zu können.

Auch der Prozess des Sehens wird durch die Umfeldhelligkeit beeinflusst. Die Sehschärfe bei Dunkelheit kann nach Angaben aus der Literatur bis auf einen Wert von 5% absinken. Demnach können Objekte nicht mehr scharf abgebildet werden und werden somit schlecht gesehen und wahrgenommen.

Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Umfeldhelligkeit und Biorhythmus und somit dem Auftreten von Leistungsengpässen in der Informationsaufnahme und -verarbeitung konnte nur teilweise bestätigt werden. Die Zahl der Einschlafunfälle weist um drei Uhr morgens einen Höhepunkt auf, ein weiterer Höhepunkt konnte gegen drei Uhr nachmittags identifiziert werden. Somit kann nicht von einer eindeutigen Beeinflussung der Leistungsfähigkeit der Informationsaufnahme und -verarbeitung durch die Umfeldhelligkeit ausgegangen werden.

4.3.2 Widrige Sichtverhältnisse

4.3.2.1 Allgemeines und Prognosen

Unter widrigen Sichtverhältnissen werden im Rahmen dieser Arbeit Sichtbeeinträchtigungen aufgrund von Nebel und Blendung verstanden.

Bei Nebel werden sehr kleine Wassertröpfchen aus der Luft ausgeschieden, die aufgrund der geringen Fallgeschwindigkeit in der Luft „schweben“. An diesen

kleinen Wassertröpfchen findet eine starke Lichtstreuung statt. Infolge des Streulichtes verringert sich nach GRAMBERG-DANIELSEN (1967) (in [KIEGELAND, 1996]) „der (Farb-)Kontrast zwischen Objekt und Umgebung, darüber hinaus absorbiert der Nebel an sich bereits einiges an Licht, was zu einer Verringerung der Umfeldleuchtdichte und des Farbkontrastes führt“. Des Weiteren kann infolge Nebel Blendung auftreten, wenn beispielsweise das fahrzeugeigene Licht von den Wassertröpfchen reflektiert wird und zum Auge des Fahrers gelangt. Somit können Objekte nicht mehr problemlos erkannt werden und der für den Fahrer wichtige visuelle Informationskanal wird stark eingeschränkt. Es wird angenommen, dass bei Sichtbeeinträchtigungen aufgrund von Nebel und der daraus resultierenden eingeschränkten Informationsdichte, der Fahrer nach Informationen „sucht“. Demnach wird sich der fixierte Bereich vergrößern. Infolge der Kontrastverwischung kann auch von einer Verringerung der „Sehschärfe“ ausgegangen werden, wodurch es zu Wahrnehmungsfehlern kommen kann und die Wahrnehmungsschwellen nicht mehr überschritten werden, das getriggerte Blickverhalten findet nur eingeschränkt statt.

Blendung im Straßenverkehr kann viele Ursachen haben. Beispielsweise kann der Fahrzeugführer von der Sonne, vom sonnenbeschienenen Schnee, den Scheinwerfern entgegenkommender Fahrzeuge oder indirekt über die Glanzstreifen bei nasser Fahrbahn (Reflexbilder) geblendet werden. Infolge Blendung (physiologisch) verschlechtern sich die Grundsehfunktionen wie Sehschärfe, Unterschiedsempfindlichkeit usw. Das Licht fällt direkt ins Auge und erzeugt dort ein Streulicht, die so genannte Schleierleuchtdichte. Aufgrund dieser Schleierleuchtdichte wird der Bildkontrast des Objektes auf dem Netzhautbild herabgesetzt. [GRAMBERG-DANIELSEN ET AL., 1984] Anhand der Auswirkungen von Blendung wird daher sowohl das gesteuerte als auch das getriggerte Blickverhalten und die Informationsaufnahme beeinflusst werden. Der Fahrer wird aufgrund des unangenehmen Empfindens der Blendung, den normalerweise fixierten Bereich (beispielsweise Gegenfahrbahn) nicht fixieren. Zudem werden aufgrund des geringeren Bildkontrastes die Wahrnehmungsschwelle nicht überschritten und eine reflektorische Blickzuwendung bleibt somit aus. Aufgrund des verschlechterten Sehvermögens werden relevante Informationen nicht aufgenommen und verarbeitet und können somit verloren gehen.

4.3.2.2 Ergebnisse aus der Literatur

Nach LIPPOLD (2000) kann davon ausgegangen werden, dass die Nebelhäufigkeit und somit auch deren Auswirkungen auf das gesteuerte Blickverhalten sowie auf den Prozess des Sehens und den Prozess des Wahrnehmens zum Einen jahreszeitlich und zum Anderen tageszeitlich verschieden ist. Es konnte ermittelt werden, dass insbesondere in den Monaten November bis Februar sowie in den Zeiten von 6.00 bis 10.00 Uhr morgens die Anzahl der Nebelunfälle höher ist. Nach DURTH (2000) steigt die Auftretenswahrscheinlichkeit von Nebel ab September stark an, bleibt bis Februar konstant hoch und sinkt im März wieder ab; nach HAWKINS (1988) tritt Nebel insbesondere von Oktober bis März zwischen 4.00 und 8.00 Uhr auf. Bezüglich der Umfeldhelligkeit konnte LIPPOLD (2000) einen Zusammenhang zu Nebelunfällen nachweisen. Danach tritt der größte Anteil an Nebelunfällen bei Dunkelheit (52%) und nur ein kleinerer Anteil bei Tageslicht (35%) auf. Hingegen konnte für Autobahnen ein umgekehrtes Ergebnis ermittelt werden. Es konnte beobachtet

werden, dass die meisten Nebelunfälle bei Tageslicht (50%) zu verzeichnen sind, bei Dunkelheit (38%) liegt dieser Wert niedriger. Die Steigerung der Unfallzahlen infolge Nebel konnte auch von weiteren Autoren nachgewiesen werden. (vgl. JENDRITZKY ET AL. (1978) und DAHMEN ET AL. (1989) beide in [KIEGELAND, 1996]) Bezogen auf die Sichtweiten im Nebel konnte LIPPOLD (2000) ermitteln, dass die meisten Unfälle bei Sichtweiten zwischen 50 und 100 m auftreten. Er weist allerdings daraufhin, dass die niedrigen Unfallzahlen im Sichtweitenbereich von kleiner 50 m auf die Häufigkeit dieser Nebelart (Sichtweiten zwischen 50 und 100 m) zurückzuführen sind.

SCHLAG und RICHTER (2000) untersuchten in einem Signal-Entdeckungs-Experiment mit Tracking-Aufgabe den Einfluss von Nebel auf die Wahrnehmung. Dazu mussten die Probanden während der Tracking-Aufgabe zwei verschiedene Signale (statisch, dynamisch) durch Betätigung zwei verschiedener Pedale (Kupplung, Bremse) für die beiden Sichtbedingungen „Nebel“ und „klare Sicht“ bestätigen. Dabei wurden die Reaktionszeit, die Qualität der Antwort sowie das Blickverhalten aufgezeichnet. Es konnte ermittelt werden, dass sich beim Fahren im Nebel das Reaktionsverhalten und das gesteuerte Blickverhalten verändern. Aufgrund der Abnahme visueller Informationen nimmt die subjektive Unsicherheit zu, die durch weitere Suche nach Informationen oder durch Inanspruchnahme von mehr Zeit kompensiert werden kann. Bei Nebel wird das gesamte Blickfeld mit häufigeren Saccaden abgesucht. Auch der periphere Bereich wird häufiger abgetastet. Demnach vergrößert sich der fixierte Bereich im Gegensatz zur klaren Sicht. Besteht bei Nebel jedoch die Möglichkeit, sich am vorausfahrenden Fahrzeug bzw. den Rücklichtern oder den Nebelschlussleuchten zu orientieren, konnte ein starres Blickverhalten beobachtet werden, welches sich durch weniger Fixationen des peripheren Bereiches auszeichnet. Unter Umständen kann sich dadurch der „Tunnelblick“ ausbilden, wonach sich der fixierte Bereich bei Orientierung am vorausfahrenden Fahrzeug verkleinert. Die Ausbildung des „Tunnelblickes“ wurde auch von weiteren Autoren beschrieben. ([HAWKINS, 1988], [KIEGELAND, 1996], [DURTH, 2000], [SCHÖNBACH, 2001]). Nach SCHÖNBACH (2001) kann für relativ viele Fahrer bei Kolonnenfahrt ein Sogeffekt durch die Rücklichter des Vordermannes und gleichzeitig ein Druckeffekt durch die Scheinwerfer des Nachfolgenden beobachtet werden. Aufgrund dieser Tatsache verkürzen sich die Abstände zum Vordermann unangemessen zur Geschwindigkeit, wodurch bei Stockungen des Verkehrs Auffahrunfälle die Folge sein können. Diese Entwicklung beschreibt auch HAWKINS (1988) in seiner Arbeit. Er kommt zum Schluss, dass der Fahrer sich der Gefahren des Nebels nicht bewusst ist und somit sein Verhalten nur bedingt anpasst. Aufgrund der Verkürzung der Abstände kann gleichzeitig von einer Verkürzung der Fixationsentfernung ausgegangen werden. Nach DURTH (2000) hat Nebel mit einer Sichtweite von über 650 m keine Auswirkungen auf die Fernorientierung und somit auf das Blickverhalten. Von einer Beeinträchtigung der Informationsaufnahme auf Autobahnen geht KIEGELAND (1996) bei Sichtweiten von 300 m aus. Für einen erfahrenen Fahrer ist, aufgrund seines vorausschauenden Fahrstils, eine Fahrt bei Nebel (eingeschränkte Sicht) sehr viel beanspruchender und verursacht beispielsweise Müdigkeit. ([DOHMAN, 1982], [KIEGELAND, 1996]) Nach DURTH (2000) wird durch die verminderte Informationsdichte bei Nebel auch die Aufmerksamkeit herabgesetzt, da der Fahrer nicht in der Lage ist, über einen größeren Zeitraum trotz geringer Information die Aufmerksamkeit so intensiv aufrecht zu erhalten.

Nach RÖNSCH-HASSELHORN (2003) stellt die Sonnenblendung die häufigste Unfallursache (seit 1994) unter den witterungsbedingten Ursachen dar. Laut Statistik wird aber aufgrund der geringen Zahlen im Vergleich zu anderen Unfallursachen von einer geringen Gefahr ausgegangen. Nach BÖHLKE (1985) (in [RÖNSCH-HASSELHORN, 2003]) werden Frauen häufiger geblendet als Männer, da die Frauen zum Einen den Blendschutz (Sonnenbrille, Sonnenblende) weniger oft benutzen und zum Anderen aufgrund ihrer kleineren Körperlänge.

Infolge Blendung wird die adaptionsabhängige Wahrnehmungsschwelle soweit angehoben, dass der Objektkontrast unterhalb dem Schwellenkontrast liegt. Es kommt zu einer Fehladaptation, wodurch es „nicht mehr möglich ist, vorher erkannte Objekte oder Kontraste weiterhin wahrzunehmen und zu erkennen“. [SCHMIDT-CLAUSEN und FREIDING, 2004]

Nach COHEN (1986) nimmt Blendung durch entgegenkommende Fahrzeuge Einfluss auf das gesteuerte Blickverhalten der Kraftfahrer. Demnach fixieren sie den Blick in der Nähe des Scheinwerfers entgegenkommender Fahrzeuge, wobei die Fähigkeit, Objekte auf der Fahrbahn oder dem rechten Randbereich wahrzunehmen, herabgesetzt wird.

4.3.2.3 Zusammenfassung

Aus den Ergebnissen der verschiedenen Untersuchungen wird deutlich, dass Sichtbehinderungen infolge Nebel und Blendung einen Einfluss auf das gesteuerte Blickverhalten, den Prozess des Sehens sowie den Prozess der Wahrnehmung ausüben. Auswirkungen auf das getriggerte Blickverhalten wurden nicht beschrieben, werden jedoch aufgrund der unterschrittenen Wahrnehmungsschwellen angenommen.

In verschiedenen Arbeiten konnte durch die Auswertung von Unfalldatenbanken nachgewiesen werden, dass infolge von Sichtbehinderungen Unfälle mit Personenschaden zu verzeichnen sind, auch wenn diese Zahlen im Vergleich zu anderen Unfallursachen sehr niedrig sind. Insbesondere im Winterhalbjahr sowie in den frühen Morgenstunden tritt Nebel verstärkt auf. Bei Nebelfahrten ohne vorausfahrenden Verkehr wird das gesamte Blickfeld mit häufigeren Saccaden abgesucht, insbesondere der periphere Bereich. Demnach kann von einer Vergrößerung des fixierten Bereiches im Gegensatz zur klaren Sicht ausgegangen werden. Entgegen der getroffenen Prognosen wurde aus verschiedenen Arbeiten deutlich, dass bei möglicher Orientierung an vorausfahrenden Fahrzeugen, sich der Effekt des Tunnelblickes ausbildet. Zudem kann insbesondere bei starkem Nebel aufgrund der geringen Sichtweiten von einer Verkürzung der Fixationsentfernung ausgegangen werden. Für Fahrten unter Blendung konnte ermittelt werden, dass, entgegen der Annahmen, der Fahrer seinen Blick in der Nähe der Blendquelle (Scheinwerfer) fixiert. Dieses Phänomen beschreibt auch HARTMANN (1984) (in [GRAMBERG-DANIELSEN ET AL., 1984]): „Es ist eine bekannte Tatsache und es lässt sich auch physiologisch ohne Schwierigkeiten begründen, daß jeder Mensch spontan dorthin sieht, wo es am hellsten ist.“ Hinsichtlich der Sonnenblendung konnten keine Angaben zum gesteuerten Blickverhalten gefunden werden.

Der Einfluss von Sichtbehinderungen auf den Prozess des Sehens wurde bereits im Kapitel 4.3.2.1 beschrieben. Bei Nebel ist der Kontrast der Objekte zum Umfeld herabgesetzt. Dieser Zustand kann mit der Verminderung der Sehschärfe verglichen

werden. Bei Blendung hingegen wird der Bildkontrast des Objektes auf dem Netzhautbild herabgesetzt. Wird die Tatsache betrachtet, dass nur die Objekte wahrgenommen werden können, die auch gesehen werden, werden die Auswirkungen von Sichtbehinderungen auf die Wahrnehmung schell deutlich.

Verschiedene Autoren beschreiben außerdem, dass insbesondere Fahrten bei Nebel aufgrund der eingeschränkten Sicht und der geringen Anzahl an Informationen einen ermüdenden Einfluss auf den Fahrer ausüben sowie dessen Aufmerksamkeit verringern. An dieser Stelle wird auf die Ausführungen in Kapitel 4.7 verwiesen.

4.4 Straßenspezifische Einflüsse

4.4.1 Querschnitt

4.4.1.1 Allgemeines und Prognosen

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluss des Querschnittes hinsichtlich seiner Breite betrachtet. Dabei wird zwischen einbahnigen und zweibahnigen Streckenabschnitten unterschieden.

Aufgrund der unterschiedlichen räumlichen Ausdehnung der Querschnitte und der damit unterschiedlichen Verteilung der visuellen Informationen im Straßenraum kann von einem Einfluss auf das gesteuerte Blickverhalten ausgegangen werden. Auf einbahnigen Straßen, beispielsweise Landstraßen, befinden sich die relevanten Informationen (Verkehrszeichen) vorwiegend am rechten Fahrbahnrand. Der Verkehr, der der Orientierung dient, fährt direkt vor dem eigenen Fahrzeug. Auf zweibahnigen Straßen hingegen können die relevanten Informationen am linken sowie am rechten Fahrbahnrand oder überkopf angebracht sein. Der Verkehr, welcher der Orientierung dient, fährt vor dem eigenen Fahrzeug allerdings auf zwei oder mehreren Fahrstreifen verteilt. Daraus ergibt sich ein größerer Bereich, in dem visuelle Informationen zu finden sind. Demnach wird angenommen, dass der fixierte Bereich auf zweibahnigen Straßen größer ist als auf einbahnigen Straßen. Des Weiteren wird vermutet, dass insbesondere im Außerortsbereich auf zweibahnigen Straßen schneller gefahren wird als auf einbahnigen Straßen. Daher wird angenommen, dass sich die Fixationsentfernung auf zweibahnigen Straßen im Vergleich zu den einbahnigen Straßen vergrößert.

4.4.1.2 Ergebnisse aus der Literatur

Nach DIEM (2004) unterscheidet sich das gesteuerte Blickverhalten auf zweibahnigen Querschnitten (beispielsweise Autobahnen) vom gesteuerten Blickverhalten auf einbahnigen Querschnitten (beispielsweise Landstraße) darin, dass sich mehrere Fixationsbereiche ausbilden. In Bild 4-3 sind links die Fixationsbereiche für Landstraßen (einbahnig, zweistreifig) und rechts für Autobahnen mit Standstreifen (zweibahnig, zweistreifig) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich auf zweibahnigen Querschnitten zum Einen die Fixationen über den gesamten Fahrbahnbereich verteilen und zum Anderen sich mehrere Fixationsbereiche ausbilden. Hinsichtlich der Fixationsentfernung wurden keine Angaben gemacht.

Geschwindigkeit das Sehfeld größer war als im Stadtbereich. Cohen führte diese Tatsache auf die Belastung durch die vorherrschende Verkehrskonstellation zurück. Demnach bewirken sich insbesondere geringe Geschwindigkeiten belastend aus und engen somit das Sehfeld ein.

4.4.2.3 Zusammenfassung

Aus den Untersuchungen von DIEM (2004) konnte ein Einfluss der Lage der Straße auf das gesteuerte Blickverhalten gefunden werden. Demnach ist der fixierte Bereich auf Innerortsstraßen größer als auf Außerortsstraßen. Die Erklärung liegt in der Verteilung der Informationen im Straßenraum. Beim Vergleich des fixierten Bereiches von Stadtstraßen mit dem von Autobahnen wird allerdings deutlich, dass nicht die Verteilung allein die Größe des fixierten Bereiches beeinflusst. Nach COHEN (1984) (in [BAGL ET AL., 1999]) bestimmt insbesondere die Belastung des Fahrers durch die vorherrschende Verkehrskonstellation das Blickverhalten. Je höher die Belastung ist, desto enger wird das Sehfeld. Demnach muss ein größerer Bereich fixiert werden, um alle relevanten Informationen aufnehmen zu können.

Der Einfluss der Belastung des Fahrers auf das Wahrnehmungsmodell wird in Kapitel 4.7.1 ausführlich geschrieben.

4.4.3 Linienführung

4.4.3.1 Allgemeines und Prognosen

Die Linienführung wird im Rahmen dieser Arbeit in die Merkmale gerade Strecke und Kurve untergliedert. Zusätzlich werden Kurven hinsichtlich ihrer Richtung und ihrer Größe betrachtet.

Entsprechend der Verteilung der Informationen in Geraden, Links- und Rechtskurven ist anzunehmen, dass das Blickverhalten durch die Linienführung beeinflusst wird. Zum Einen benötigt der Fahrer zum Führen des Fahrzeugs Informationen über den Streckenverlauf, zum Anderen muss er relevante Informationen, beispielsweise Verkehrszeichen, aufnehmen können. Für Geraden wird angenommen, dass sich der Fixationsbereich aufgrund der Verteilung der Informationen im Bereich des Fluchtpunktes der Straße in großer Entfernung befindet. Zudem ist die Führung des Fahrzeugs in Geraden weniger anspruchsvoll, so dass der Fahrer nur wenige zusätzliche Informationen über den Verlauf der Straße benötigt, demnach wird sich ein relativ kleiner Fixationsbereich ausbilden. Im Bereich von Kurven wird von einem veränderten gesteuerten Blickverhalten ausgegangen. Der Fahrer benötigt hierbei zusätzliche Informationen über den Verlauf der Straße, um diese sicher befahren zu können. Je nach dem, wie die Kurve gestaltet ist (übersichtlich, unübersichtlich) wird sich ein unterschiedliches gesteuertes Blickverhalten ausprägen. Es wird vermutet, dass sich der Fahrer bei unübersichtlichen Linkskurven eher am linken Fahrbahnrand orientieren wird, wobei sich gleichzeitig die Fixationsentfernung aufgrund der Kurvengeometrie verkürzt. Zudem muss er noch Informationen der Verkehrszeichen aufnehmen, die sich vermehrt am rechten Fahrbahnrand befinden. Für unübersichtliche Rechtskurven hingegen wird sich der Fahrer eher am rechten Fahrbahnrand orientieren, dabei verkürzt sich ebenfalls die Fixationsentfernung. Es wird vermutet,

dass sich der Fixationsbereich in einer vergleichbaren Fixationsentfernung befindet, wobei dieser in Linkskurven größer ist als in Rechtskurven.

4.4.3.2 Ergebnisse aus der Literatur

Auch der Einfluss der Linienführung auf das gesteuerte Blickverhalten kann aus den Ergebnissen der Untersuchungen von DIEM (2004) erschlossen werden. Da auf Stadtstraßen das Blickverhalten maßgeblich durch andere Verkehrsteilnehmer beeinflusst wird, wurde der Einfluss der Linienführung hier als sehr gering eingestuft. Aus dem Vergleich der Blickverteilungen im Außerortsbereich konnte ermittelt werden, dass bei Radien ab einer Größe von 500 m keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zu Geraden auftreten. Daher kann ein Einfluss der Linienführung auf das gesteuerte Blickverhalten auf Autobahnen bzw. autobahnähnlichen Straßen ausgeschlossen werden. Einen direkten Einfluss der Linienführung konnte nur auf Landstraßen nachgewiesen werden. In Linkskurven mit einem Kurvenradius von 250 m wird vermehrt der rechte Fahrbahnrand (Tag) fixiert; verringert sich der Kurvenradius, verschiebt sich dieser Bereich in Richtung linker Fahrbahnrand. In Rechtskurven mit einem Radius von 250 m erstreckt sich der Fixationsbereich über den gesamten Fahrbahnbereich (Tag); verringert sich der Kurvenradius, verschiebt sich dieser Bereich auf den rechten Fahrbahnrand. Anhand der Ergebnisse wurde zudem deutlich, dass mit abnehmender Radiengröße sich auch die Fixationsentfernung verringert.

Eine weitere Untersuchung zum Einfluss der Linienführung auf das Blickverhalten führte COHEN (1985) durch. Er untersuchte das gesteuerte Blickverhalten auf Straßen mit geraden Abschnitten sowie im Annäherungsbereich von Kurven und Kreuzungen sowie in Kurven selbst. Er führte die Untersuchungen im innerstädtischen Bereich unter Ausschluss anderer Verkehrsteilnehmer durch. Für die Annäherungsbereiche an Kurven konnte im Vergleich zu geraden Abschnitten ermittelt werden, dass durchschnittlich 14% mehr Stellen pro Zeiteinheit fixiert wurden. Außerdem fixierten die Fahrer auf geraden Abschnitten vermehrt die linke Straßenseite, im Annäherungsbereich die rechte. Des Weiteren konnte nachgewiesen werden, dass der Fixationsbereich auf geraden Abschnitten größer war als im Annäherungsbereich an Kurven. Innerhalb von Kurven war der fixierte Bereich wiederum kleiner als in ihrem Annäherungsbereich. Der große Fixationsbereich auf geraden Abschnitten wird mit der vermehrten Aufmerksamkeitszuwendung an nicht-relevante Objekte in der Umgebung begründet. Bezüglich der Kurvenrichtung wird zwischen den Informationen für die Führung des Fahrzeugs und für die Stabilisierung des Fahrzeugs unterschieden. Demnach liegen die Informationen für die Führung des Fahrzeugs weiter entfernt als die Informationen für die Stabilisierung des Fahrzeugs, wobei die Stabilisierung des Fahrzeugs vorrangig ist. Anhand der Ergebnisse konnte er nachweisen, dass in übersichtlichen Kurven die Fixationsentfernung geringer ist als in unübersichtlichen⁷ Kurven. In unübersichtlichen Links- sowie Rechtskurven erhält der Fahrer die Informationen zur Stabilisierung des Fahrzeugs vom rechten Fahrbahnrand. Die Informationen zur Führung des Fahrzeug liegen in Linkskurven über den linken Fahrbahnrand hinaus

⁷ In einer unübersichtlichen Kurve ist die Ausfahrt aus der Kurve bei der Einfahrt in die Kurve nicht erkennbar. [COHEN, 1985]

auf der weiter entfernten rechten Straßenseite. In Rechtskurven liegen die Informationen zur Führung des Fahrzeug über den rechten Fahrbahnrand hinaus auf der weiter entfernten linken Straßenseite. (vgl. Bild 4-5) Auch nach KAYSER (1989) (in [BAGL ET AL., 1999]) wird insbesondere im Annäherungsbereich von Kurven, dieser durch vermehrte Fixationen erkundet. Außerdem konnte die größte Fixationsdichte um den Leitpunkt (der Kurve) beobachtet werden.

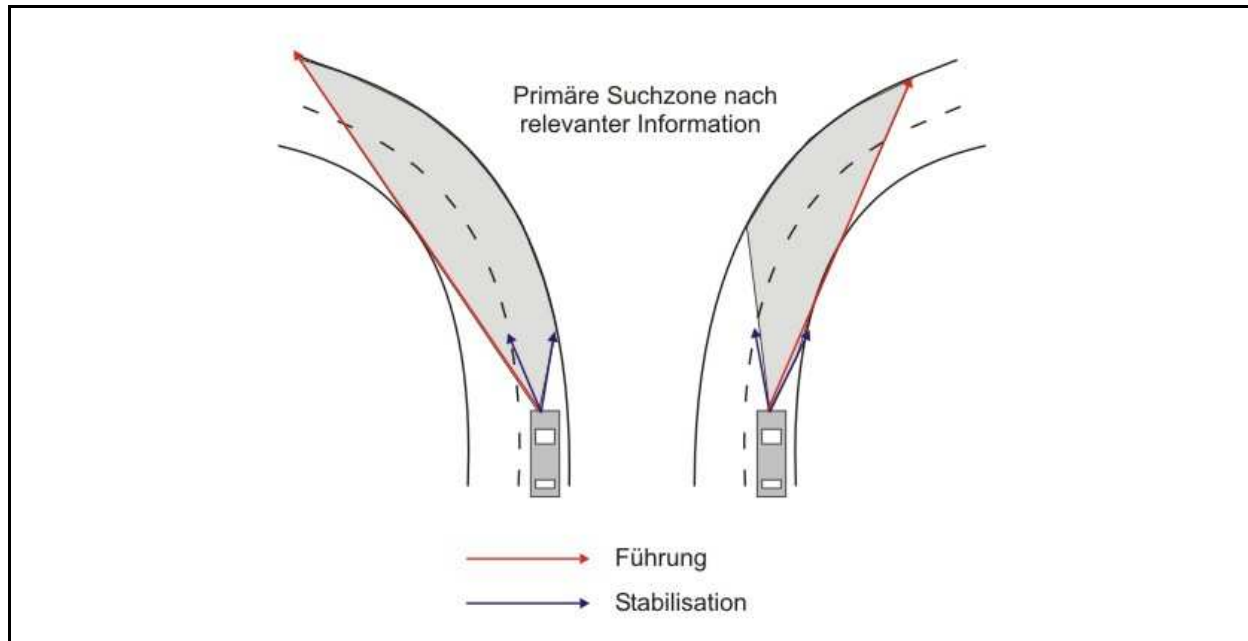


Bild 4-5: Schematische Darstellung der primären Suchzone nach visueller Information in einer unübersichtlichen Rechts- und Linkskurve [Cohen, 1985]

Nach COHEN (1986) wird in Rechtskurven vermehrt der rechte Fahrbahnrand fixiert, in Linkskurven der gesamte Fahrbahnbereich, wobei die näheren Fixationen in der Fahrstreifenmitte bzw. am rechten Fahrbahnrand liegen, die weiter entfernten Fixationen liegen am linken Fahrbahnrand. Das unterschiedliche Verhalten in Links- und Rechtskurven wird damit begründet, dass die Informationen im Straßenraum unterschiedlich verteilt sind. (vgl. auch WOLTER ET AL. (1992), FRIEDINGER (1983), GRAF und KREBS (1976) alle in [BERGER, 1993])

LAYA (1992) (in [BAGL ET AL., 1999]) untersuchte das Blickverhalten in Kurven. Anhand der Ergebnisse konnten jedoch keine signifikanten Unterschiede im Blickverhalten zwischen Kurven mit großen und mit kleinen Radien nachgewiesen werden. JURGENSOHN et al. (1991) (in [BAGL ET AL., 1999]) konnten in Kurven Blickbewegungen nach einem „Sägezahnmuster“ beobachten, wonach der Fahrer einen Punkt fixiert, bei Annäherung auf 10 bis 35° an diesen Punkt „springt“ der Fahrer zum nächsten Punkt, an den er sich wiederum annähert usw. Demnach liegt ein einheitliches Blickverhalten in Kurven vor, die Blickdistanz ist abhängig vom Kurvenradius.

4.4.3.3 Zusammenfassung

Anhand der Ergebnisse der verschiedenen in der Literatur dokumentierten Untersuchungen konnten die in Kapitel 4.4.3.1 prognostizierten Abhängigkeiten bestätigt werden. Es wurde deutlich, dass die Linienführung einen erheblichen Einfluss auf das gesteuerte Blickverhalten der Fahrer ausübt. Dabei wurde zwischen

Geraden, Links- und Rechtskurven unterschieden. In Tabelle 4.2 sind die wichtigsten Ergebnisse nochmals zusammengefasst.

Linienführung	außerorts	innerorts <i>(für primäre Stabilisierung)</i>
Gerade	rechter Fahrbahnrand	Linker Fahrbahnrand
Linkskurve	rechter Fahrbahnrand	gesamter Fahrbahnbereich
Enge Linkskurve	linker Fahrbahnrand	linker Fahrbahnrand
Rechtskurve	gesamter Fahrbahnbereich	rechter Fahrbahnrand
Enge Rechtskurve	rechter Fahrbahnrand	rechter Fahrbahnrand

Tabelle 4.2: Lage der Fixationsbereiche am Tag für außerorts [DIEM, 2004] und innerorts [COHEN, 1985], [COHEN, 1986]

Hinsichtlich der Fixationsentfernung konnte zum Einen ermittelt werden, dass sich diese in Kurven im Gegensatz zur Geraden verkürzt, zum Anderen konnte der Zusammenhang zwischen Größe des Kurvenradius und Fixationsentfernung nachgewiesen. Demnach verkürzt sich die Fixationsentfernung mit abnehmendem Kurvenradius.

4.5 Verkehrsspezifische Einflüsse

4.5.1 Verkehrsstärke

4.5.1.1 Allgemeines und Prognosen

Die Verkehrsstärke ist die Anzahl der Fahrzeuge, die in einen bestimmten Zeitraum eine Straße oder einen Straßenabschnitt befahren oder eine Kreuzung überqueren. Sie gilt als das Maß für die durchschnittliche Dichte des Verkehrs, bezogen auf einen bestimmten Zeitraum.

Der Fahrer orientiert sich an anderen Fahrzeugen im Straßenraum, insbesondere an den vorausfahrenden Fahrzeugen. Demnach kann von einer Beeinflussung der Verkehrsstärke auf das gesteuerte Blickverhalten ausgegangen werden, denn: Je mehr Fahrzeuge im Straßenraum vorhanden sind, desto höher ist die Informationsdichte der jeweiligen Situation. Es wird angenommen, dass sich der fixierte Bereich mit zunehmender Verkehrsstärke und mit steigender Informationsdichte vergrößert. Insbesondere auf zweibahnigen Straßen mit zwei und mehr Fahrstreifen ist diese Entwicklung zu erwarten. Auch auf einbahnigen Landstraßen ist infolge einer höheren Verkehrsstärke eine Ausprägung eines weiteren Fixationsbereiches auf dem entgegenkommenden Fahrstreifen möglich. Auf Stadtstraßen hingegen ist aufgrund der vorherrschenden Informationsdichte keine Veränderung zu erwarten.

Des Weiteren ist davon auszugehen, dass mit zunehmender Verkehrsstärke die visuelle Belastung des Fahrers ansteigt. Der Einfluss der Belastung des Fahrers auf das Wahrnehmungsmodell wird in Kapitel 4.7.1 ausführlich geschrieben.

4.5.1.2 Ergebnisse aus der Literatur

Nach ROCKWELL (1988) (in [THEOFANOU, 2002]) sinkt die mittlere Fixationsdauer mit ansteigender Verkehrsstärke. Demnach beträgt die mittlere Fixationsdauer für Verkehrszeichen bei geringer Verkehrsstärke 2,0 Sekunden, bei höherer Verkehrsstärke 0,9 Sekunden.

DIEM (2004) konnte ermitteln, dass das gesteuerte Blickverhalten von der Verkehrsstärke beeinflusst wird. Er beschreibt, dass beispielsweise ein vorausfahrendes Fahrzeug (bis zu einer Entfernung von etwa 75 m) dem Fahrer relativ genaue Informationen über den weiteren Verlauf der Straße gibt, so dass dieser sich an diesem Fahrzeug orientiert. Auf Autobahnen bzw. autobahnähnlichen Straßen mit hoher Verkehrsstärke hat das zur Folge, dass sich der fixierte Bereich vergrößert und sich mehrere Fixationsbereiche ausbilden. Bei geringer Verkehrsstärke hingegen entfällt die Fixation der entsprechenden Bereiche und es entsteht nur ein kleiner Fixationsbereich in der Mitte des eigenen Fahrstreifens, nahe des Horizonts. Für Landstraßen und Stadtstraßen werden keine Ergebnisse angegeben.

4.5.1.3 Zusammenfassung

Es wurde deutlich, dass die Verkehrsstärke Einfluss auf das gesteuerte Blickverhalten nimmt. Zusammengefasst kann gesagt werden, je höher die Verkehrsstärke, desto größer ist der fixierte Bereich. Auch wenn DIEM (2004) für Landstraßen und Stadtstraßen keine Ergebnisse liefert, ist die zuvor getroffene Aussage zumindest auf die Landstraßen übertragbar. Zudem konnte ermittelt werden, dass sich aufgrund der hohen Informationsdichte die mittlere Fixationsdauer um bis zu 50% verringert. Dieses Ergebnis ist nachvollziehbar, denn je mehr relevante Informationen vorhanden sind desto mehr Objekte müssen im gleichen Zeitraum fixiert werden.

4.5.2 Gefahrene Geschwindigkeit

4.5.2.1 Allgemeines und Prognosen

Die gefahrene Geschwindigkeit hat einen sehr bedeutenden Einfluss auf das gesteuerte Blickverhalten. Es ist nachvollziehbar, dass bei gleich bleibender Informationsdichte, die Anzahl der auf den Fahrer einströmenden Informationen mit zunehmender Geschwindigkeit ansteigt. Es können jedoch pro Sekunde nur etwa drei Objekte fixiert werden. [COHEN, 1987a] Je mehr Objekte fixiert werden müssen, um eine ausreichende Übersicht zu erhalten, umso höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass wichtige Informationen übersehen werden. Daher wird angenommen, dass sich die Fixationsentfernung vergrößert, um eine vollständige Übersicht zu erlangen. Wird der Straßenraum in größerer Entfernung fixiert, ist die Größe des Fixationsbereiches aufgrund der geometrischen Gegebenheiten kleiner. Daher wird vermutet, dass sich die Größe des Fixationsbereiches mit zunehmender Geschwindigkeit verringert. Dieses Phänomen ist auch als „Tunneleffekt“ bekannt, der periphere Sehbereich verliert an Bedeutung und periphere Objekte werden „übersehen“.

4.5.2.2 Ergebnisse aus der Literatur

Nach BERGER (1993) verändert sich mit zunehmender Geschwindigkeit das gesteuerte Blickverhalten. Aufgrund der verstärkten Konzentration auf den entfernten Straßenabschnitt zur Orientierung und für frühzeitige

Reaktionsmöglichkeiten vergrößert sich die Fixationsentfernung. Zudem engt sich der Blickwinkelbereich ein, was mit dem perspektivisch kleiner werdenden Straßenabbild erklärt wird.

Für den Einfluss der gefahrenen Geschwindigkeit gilt nach dem „Traffic Engineering Handbook“ (o. J.) (in [HAV, 2002]), je höher die Geschwindigkeit, desto weiter ist der fixierte Punkt vom Fahrer entfernt. Bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h wird ein Punkt im Abstand von 130 m fixiert, bei einer Geschwindigkeit von 60 km/h hat dieser Punkt bereits eine Entfernung von 320 m erreicht, bei 100 km/h ist der Punkt 560 m entfernt. Des Weiteren verändert sich der Blickwinkel (Größe des Gesichtsfeldes) mit zunehmender Geschwindigkeit. In Bild 4-6 ist dieser Zusammenhang dargestellt. Es ist erkennbar, dass sich infolge der Geschwindigkeitserhöhung um 40 km/h (von 60 km/h auf 100 km/h) der Blickwinkel fast halbiert.

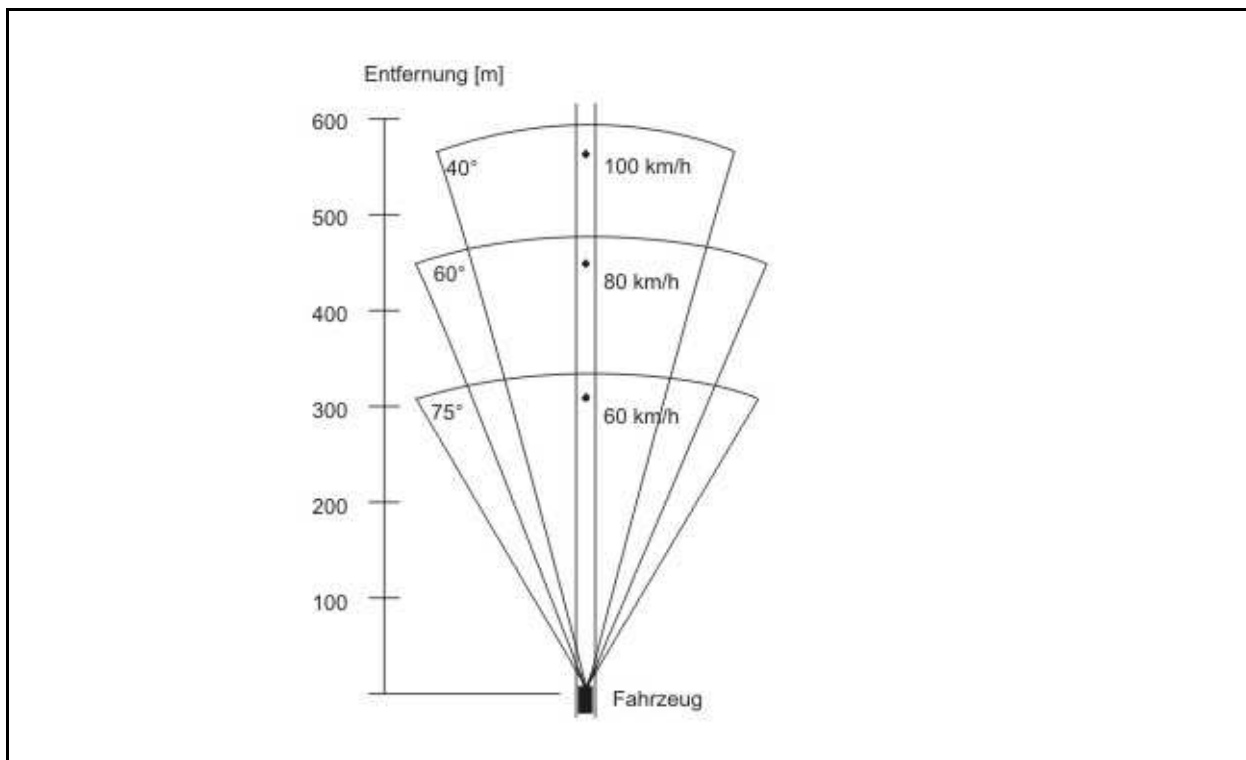


Bild 4-6: Blickpunkte und Blickwinkel in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit („Traffic Engineering Handbook“ (o. J.) in [HAV, 2002])

Die Ergebnisse von DIEM (2004) hinsichtlich der Verringerung der Fixationsentfernung wurden nicht in Abhängigkeit von der gefahrenen Geschwindigkeit angegeben. Somit kann kein direkter Vergleich zu den in den HAV (2002) angegebenen Werten gezogen werden. Es wird allerdings deutlich, dass die in den HAV angegebenen Werten weit über den von DIEM ermittelten Werten liegen. Beim Vergleich einer Landstraße, auf der eine Geschwindigkeit von 100 km/h gefahren wird, wird in den HAV eine Fixationsentfernung von 560 m angegeben. Im Vergleich konnte DIEM für eine Gerade bei Tag 120 m ermitteln. Für das Durchfahren der Fixationsentfernung nach HAV benötigt der Fahrer 20,0 s, für die Fixationsentfernung nach DIEM in etwa 4,3 s. Da sich die vorherrschende Verkehrskonstellation schnell ändern kann, sind so große Werte für die Fixationsentfernung, wie in den HAV angegeben, allerdings nicht realistisch.

Anhand von Blickverhaltensuntersuchungen konnte COHEN (1987c) nachweisen, dass die Fixationsentfernung auf Landstraßen trotz höherer Geschwindigkeit (90 km/h) bei ca. 140 m liegt und somit näher zum Fahrzeug rückt als bei einer Autobahnfahrt mit 80 km/h. Demnach kann nicht von einer generellen Abhängigkeit von der tatsächlichen Geschwindigkeit ausgegangen werden. Es ist allerdings denkbar, dass sich im betrachteten Fall aufgrund der Linienführung der Landstraße die Größe der Fixationsentfernung verkürzt.

Aus den Untersuchungen von HIRSCHBERGER und MIEDEL (1980) sowie BABKOV (1973) (beide in [BAGL ET AL., 1999]) konnten hinsichtlich der Formänderung des Sehfeldes ähnliche Ergebnisse abgeleitet werden. Demnach verringert sich die Größe des Sehfeldes bei 100 km/h um die Hälfte, gegenüber dem Stillstand. Des Weiteren ist zu erkennen, dass sich die Form des Sehfeldes verändert. Bis zu einer Geschwindigkeit von 60 km/h wird auch der Bereich direkt vor dem Fahrzeug abgebildet, bei höheren Geschwindigkeiten entfällt dieser Bereich. (vgl. Bild 4-7)

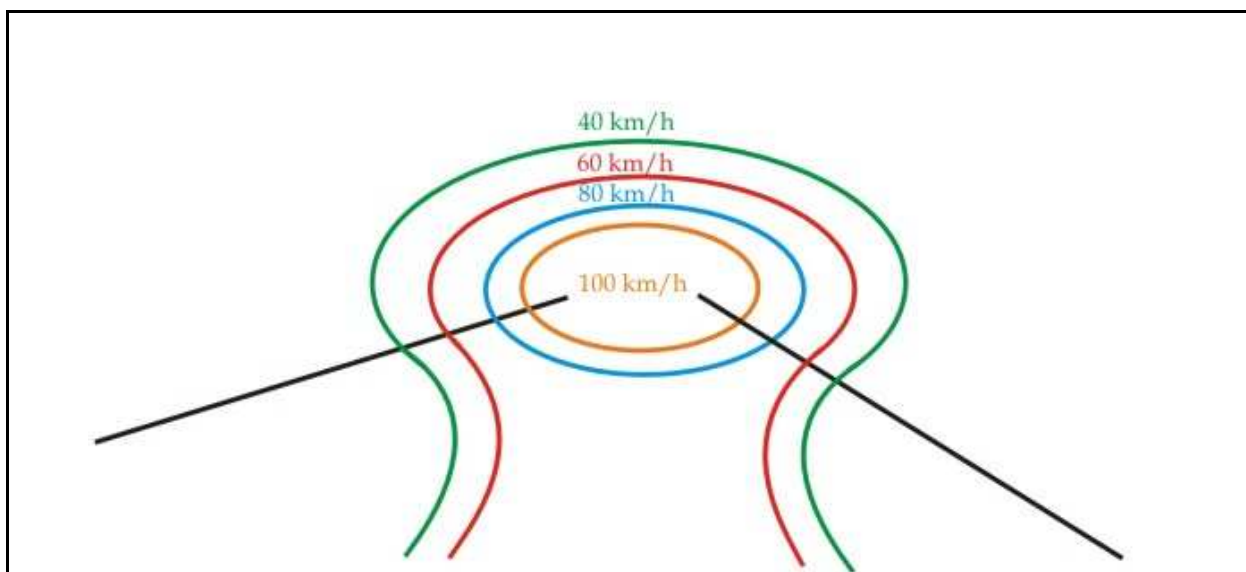


Bild 4-7: Abhängigkeit des Sehfeldes von der gefahrenen Geschwindigkeit [BAGL ET AL., 1999]

Hingegen kann nach COHEN (1987b) allerdings nicht von einer geschwindigkeitsabhängigen Einengung des nutzbaren Sehfeldes ausgegangen werden. Er untersuchte die Ausdehnungen des Sehfeldes während einer Autobahnfahrt und einer Fahrt im Stadtgebiet. Die Einengung des nutzbaren Sehfeldes liegt nach seiner Meinung in der steigenden Belastung infolge externer Information begründet. (vgl. Kapitel 4.7.1)

4.5.2.3 Zusammenfassung

Aus den zuvor beschriebenen Untersuchungsergebnissen wird deutlich, dass die Geschwindigkeit einen Einfluss auf das gesteuerte Blickverhalten und auf die Fixationsentfernung ausübt. Bezogen auf die Fixationsentfernung konnten allerdings keine genauen quantitativen Angaben gefunden werden. Allerdings kann gesagt werden, dass sich die Fixationsentfernung mit zunehmender Geschwindigkeit vergrößert, wobei die in den HAV angegebenen Werte zu groß sind. Zudem konnte ermittelt werden, dass nicht die Geschwindigkeit allein Einfluss auf die Fixationsentfernung ausübt, es ist eher ein Zusammenspiel mehrerer Parameter, die

diese Entwicklung verursachen. Bezogen auf die Größe des fixierten Bereiches konnten nur widersprüchliche Aussagen gefunden werden.

Um genaue Aussagen zu diesem Einflussparameter treffen zu können, bedarf es weiterer Forschung. Es muss untersucht werden, in wie weit die Geschwindigkeit Einfluss auf die Fixationsentfernung nimmt und ob sich eine Einschränkung des Sehfeldes nachweisen lässt. Dabei sollte zwischen den verschiedenen Lagen der Straße (innerorts, außerorts) sowie zwischen den verschiedenen Querschnitten (einbahnig, zweibahnig) unterschieden werden.

4.6 Fahrerspezifische Einflüsse - Langfristig wirkende Variablen

4.6.1 Geschlecht

4.6.1.1 Allgemeines und Prognosen

Ein geschlechtsspezifischer Einfluss auf die Teilmodelle Sehen und Wahrnehmen wird nicht vermutet. Geschlechtsspezifische Unterschiede sind eher in den folgenden Bereichen zu beobachten:

- Fahrleistung,
- Geschwindigkeitswahl,
- Beurteilung des Unfallrisikos sowie
- Einschätzung der eigenen Leistungsfähigkeit.

Der Einfluss des Geschlechts wird eher als sekundärer Einfluss auf das gesamte Perception-Modell verstanden, beispielsweise, dass aufgrund der geringeren Fahrleistung die Fahrerfahrung weniger stark ausgeprägt ist oder dass aufgrund der geringer gewählten Geschwindigkeit die Informationsaufnahme und -verarbeitung weniger stark beansprucht wird.

4.6.1.2 Ergebnisse aus der Literatur

Nach HAAS ET AL. (1991) (in (ABENDROTH, 2001)) weisen Frauen eine geringere durchschnittliche Gesamtfahrleistung sowie Jahresfahrleistung auf. Auch PANNASCH (1999) konnte bei der Auswertung der biographischen Daten des Probandenkollektivs (N=18) feststellen, dass das Geschlecht in Zusammenhang mit der Fahrerfahrung steht. Demnach verfügen 2/3 der männlichen Probanden über viel Fahrerfahrung (mehr als 100.000 km), der Anteil der weiblichen Probanden liegt bei ca. 10%. Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs war eine Verallgemeinerung der Aussage jedoch nicht möglich.

Bezogen auf die Geschwindigkeit konnten KÜSTER und REITER (1987) (in (ABENDROTH, 2001)) ermitteln, dass Frauen im Durchschnitt langsamer fahren als Männer. Im Gegensatz dazu konnte HOLTE (1993) (in (ABENDROTH, 2001)) allerdings keine geschlechtsspezifischen Unterschiede feststellen.

Des Weiteren berichten TRÄNKLE und METKER (1992), dass Männer ihr Fahrkönnen allgemein überschätzen, ihre Fahrweise als weniger gefährlich beurteilen und schwierige Aufgaben als leichter zu bewältigen einstufen als Frauen.

Hinsichtlich des Wahrnehmungsvorgangs gibt es nach HARRINGTON und MCBRIDE (1970) (in [COHEN, 1986]) keine geschlechtsspezifischen Differenzen im Wahr-

nehmungsvorgang, die Unterschiede sind auf motivationelle Unterschiede (beispielsweise Geschwindigkeitwahl) zurückzuführen. Demnach billigen insbesondere männliche Fahrer ein höheres Risiko als weibliche Fahrer. Vergleichbare Ergebnisse ermittelten BEJIER ET AL. (2004) in Bezug auf das Blickverhalten.

4.6.1.3 Zusammenfassung

Anhand der Literatur konnte kein direkter Zusammenhang zwischen dem Geschlecht und dem gesteuerten Blickverhalten sowie dem Sehen und Wahrnehmen gefunden werden. Die Annahme hingegen, dass sich dieser Parameter eher als sekundärer Einfluss charakterisieren lässt, bestätigte sich. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Frauen im Vergleich zu Männern eine geringere Fahrleistung aufweisen, eine geringere Geschwindigkeit wählen und weniger riskante Fahrmanöver eingehen.

4.6.2 Alter

4.6.2.1 Allgemeines und Prognosen

Im Hinblick auf die sich verändernde Demographie in Deutschland, wird im Rahmen dieser Arbeit diesem Parameter besonders viel Aufmerksamkeit geschenkt. In Tabelle 4.3 ist die Bevölkerungsverteilung in Deutschland für das Jahr 2008 und prognostiziert für die Jahre 2025 und 2050 dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Bevölkerung bis zum Jahr 2050 insgesamt um 16% abnehmen wird. Zudem ist davon auszugehen, dass sich die Verteilung der Bevölkerung in den Altersgruppen wesentlich verändert. Die Zahl der Personen in der Altersgruppe 20 bis 64 Jahre wird sinken, die Zahl der Personen in der Altersgruppe über 65 Jahre hingegen wird ansteigen. Gründe dafür sind zum Einen die gestiegene Lebenserwartung aufgrund der medizinischen Versorgungsmöglichkeiten und der hohen Lebensqualität, zum Anderen die stagnierende oder gar rückläufige Geburtenrate. Die Folge ist eine immer älter werdende Gesellschaft, was sich auch auf den Bereich des Straßenverkehrs auswirkt. Die Zahl der Führerscheininhaber der Altersgruppe über 65 Jahre wird weiter ansteigen und es werden somit mehr ältere Menschen aktiv am Verkehr teilnehmen als bisher.

Jahr Altersgruppen	2008		2025		2050	
65+	16,7 Mill.	20%	20,1 Mill.	25%	22,9 Mill.	33%
20-64	49,8 Mill.	61%	45,7 Mill.	58%	35,5 Mill.	52%
0-19	15,6 Mill.	19%	13,1 Mill.	17%	10,4 Mill.	15%
Gesamt	82,1 Mill.	100%	78,9 Mill.	100%	68,8 Mill.	100%

Tabelle 4.3: Prognostizierte Entwicklung der Bevölkerungsverteilung nach Alter in Deutschland bis zum Jahr 2050 [STATISTISCHES BUNDESAMT, 2008]

Nach FASTENMEIER ET AL. (2005) treten im Alter verschiedene psychophysische Veränderungen auf, die sich zum Teil auch auf den Prozess des Sehens, den Prozess des Wahrnehmens und das Blickverhalten auswirken und somit auch verkehrssicherheitsrelevante Leistungen des Fahrers beeinträchtigen. (vgl. Tabelle 4.4)

Verminderte Wahrnehmungsfähigkeiten	Verengung des Blickfeldes (peripheres Sehen)
	Abnahme der Dämmerungssehschärfe, erhöhte Blendempfindlichkeit
	Verschlechterung der Akkommodation
	Nachlassen des Hörvermögens (besonders für hohe Töne)
Verlangsamte zentrale Informationsverarbeitungsprozesse	Verlangsamung von Informationsverarbeitung und Koordination mit Motorik
	Verschlechterung von Distanz- und Geschwindigkeitsschätzung
	Höhere Anfälligkeit von Ablenkung
Eingeschränkte motorische Reaktionen	Beweglichkeit, Sensitivität und Kraft lassen nach
	Eingeschränkte Beweglichkeit der Halswirbelsäule
	Verlangsamung der Reaktion und der Motorik

Tabelle 4.4: Psychophysische Einschränkungen älterer Menschen [FASTENMEIER ET AL., 2005]

Es ist davon auszugehen, dass die beschriebenen psychophysischen Veränderungen infolge Alterung Einfluss auf das gesamte Perception-Modell nehmen. Neben der Verschlechterung der Sehleistung aufgrund der Veränderungen im Sehapparat treten auch Veränderungen im Bereich der Informationsverarbeitung auf. Es wird angenommen, dass die Informationen nur eingeschränkt aufgenommen und nur verlangsamt verarbeitet werden können. Zudem ist davon auszugehen, dass sich auch die Saccadengeschwindigkeit verringert. Demnach fixieren ältere Fahrer im Vergleich zu jüngeren Fahrern in der gleichen Zeit weniger Objekte, wodurch relevante Informationen verloren gehen können. Im Folgenden werden die in der Literatur angegebenen Auswirkungen des Alterungsprozesses auf den Prozess des Sehens, den Prozess des Wahrnehmens und das Blickverhalten beschrieben.

4.6.2.2 Ergebnisse aus der Literatur

Neben den im Folgenden beschriebenen funktionalen Veränderungen infolge Alterung treten auch neuronale Veränderungen auf. Zu den wichtigsten altersbedingten Veränderungen zählen: die Verringerung der Anzahl von Stäbchen und Zapfen auf der Netzhaut, die anatomische Veränderungen der Photorezeptoren und der Rückgang der Anzahl an Nervenfasern im Sehnerv. Es ist allerdings nicht bekannt, in welchem Maß diese neuronalen Veränderungen die Sehfunktionen älterer Menschen beeinflussen. [HOHMANN, 1991]

Nach COHEN (1986) nimmt mit zunehmendem Alter die Häufigkeit von Sehfehlern zu. In Bild 4-8 ist der Anteil der Personen mit Sehfehler in Abhängigkeit vom Alter graphisch dargestellt. Es wird deutlich, dass bereits im Alter von 50 Jahren etwa 70% der Menschen einen Sehfehler aufweisen. Bei einem Alter von 70 Jahren wird davon ausgegangen, dass alle Personen einen Sehfehler aufzeigen. Nach GOLDSTEIN (2002) gibt es die in Tabelle 4.5 beschriebenen vier Hauptarten von Veränderungen im Sehapparat, die zu Sehbeeinträchtigungen bzw. Sehfehlern führen können.

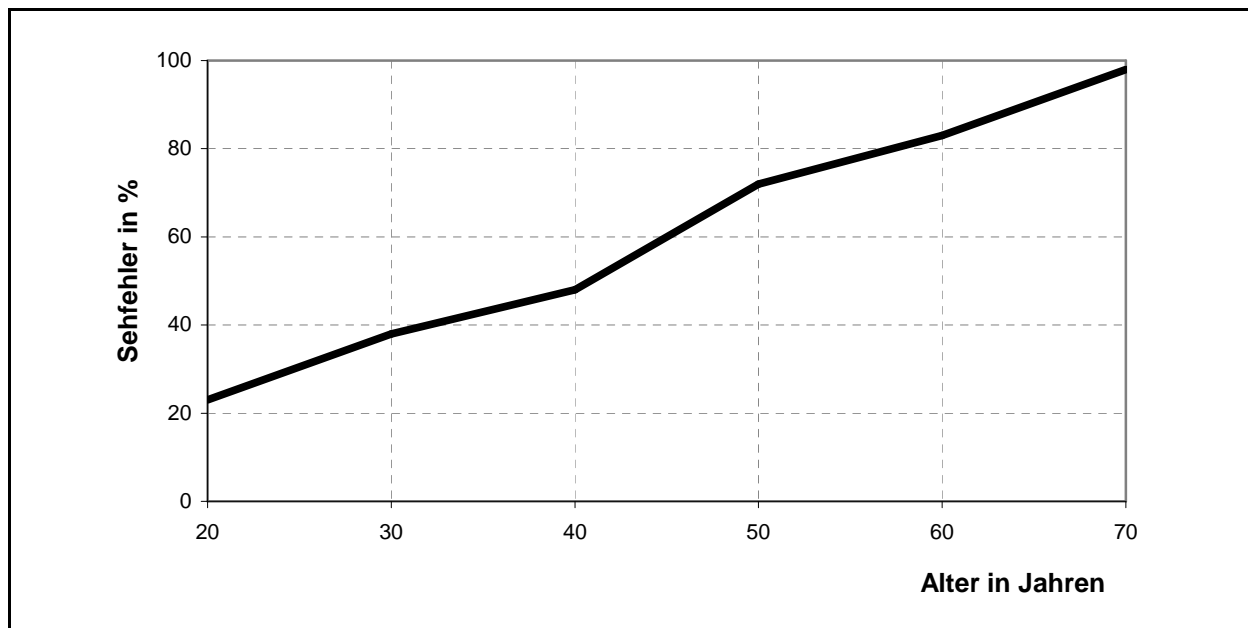


Bild 4-8: Anteil der Personen mit Sehfehler in Abhängigkeit vom Alter [COHEN, 1986]

Veränderungen im Sehapparat	Sehbeeinträchtigung bzw. Sehfehler
Fehlsichtigkeiten aufgrund von Brechungsfehlern auf der Netzhaut	Kurzsichtigkeit, Weitsichtigkeit, altersbedingte Abnahme der Akkommodationsfähigkeit (Alterssichtigkeit), Stabsichtigkeit
Verminderte Lichtdurchlässigkeit des Auges	Hornhauterkrankungen und -verletzungen, altersbedingte Linsentrübung (Grauer Star),
Beeinträchtigung der Funktion der Netzhaut	altersbedingte Makuladegeneration, Netzhautablösung, erbliche Netzhautdegeneration, Retinopathia diabetica
Schädigungen des Sehnervs	Glaukom (Grüner Star),

Tabelle 4.5: Sehbeeinträchtigungen und die daraus folgenden Probleme [GOLDSTEIN, 2002]

Mit zunehmendem Alter des Fahrers⁸ verschlechtert sich die Sehschärfe. Es ist bekannt, dass die so genannte Alterssichtigkeit vermehrt ab dem 40. Lebensjahr auftritt und sich ab dem 50. Lebensjahr gravierend auf das Sehvermögen auswirkt. Nach METHLING und PESCHKE (1987) beträgt die durchschnittliche Sehschärfe mit 50 Jahren ca. 85% des Maximalwertes (bezogen auf 30 Jahre), mit 60 Jahren ca. 75% und mit 80 Jahren ca. 50%. In Bild 4-9 ist die Sehschärfe in Abhängigkeit vom Alter für Tag und Dämmerung abgebildet. Die gestrichelte Linie beschreibt die Sehschärfe bei Tag, in Anlehnung an die Angaben von METHLING und PESCHKE (1987). Der Verlauf der durchgezogenen Linie beschreibt die reduzierte Sehschärfe bei Dämmerung (typischer Adaptationszustand für den nächtlichen Straßenverkehr). Dabei wurde die Verminderung nach LACHENMAYR ET AL. (1996) angenommen. (vgl. auch [HOHMANN, 1991])

⁸ Es wird daraufhin gewiesen, dass eine zu geringe Sehschärfe nicht nur ein Problem des Alterns darstellt. Auch bei jüngeren Menschen können bereits Sehmängel auftreten, die Häufigkeit ist jedoch weitaus geringer.

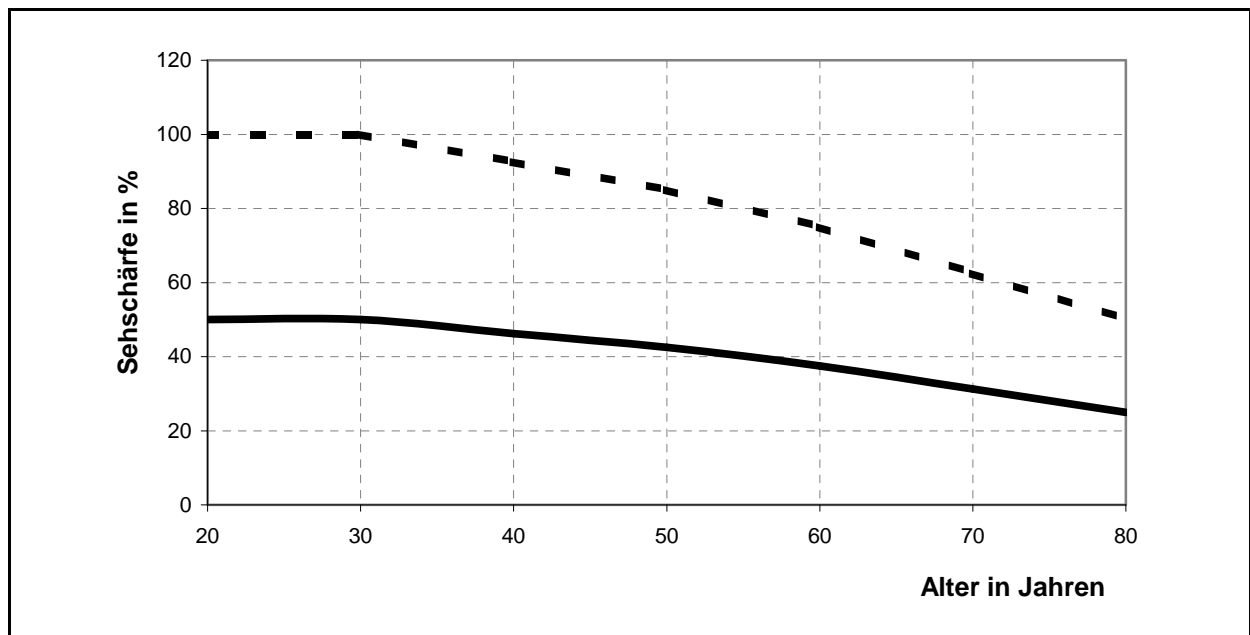


Bild 4-9: Veränderung der Sehschärfe über das Alter für Tag (gestrichelte Linie) [METHLING und PESCHKE, 1987] und Dämmerung (durchgezogene Linie) [LACHENMAYR ET AL., 1996]

Aufgrund von Trübungen der Hornhaut, der Linse und des Glaskörpers steigt die Blendempfindlichkeit mit zunehmendem Alter stark an. Nach HARTMANN (1984) (in [GRAMBERG-DANIELSEN ET AL., 1984]) kann davon ausgegangen werden, dass „60jährige [...] im Mittel 3- bis 4mal so empfindlich wie 20jährige“ sind. Die zumutbare Leuchtdichte für einen 60jährigen beträgt ca. 4 cd/m², für einen 20jährigen beträgt sie ca. 13 cd/m². (vgl. Bild 4-10) Infolge der Blendung und dem damit verbundenen geringeren Kontrastunterschied können Informationen übersehen werden. Besonders bei Fahrten in der Dunkelheit wird diese Einschränkung des Sehvermögens bei Blendung durch die Scheinwerfer des Gegenverkehrs deutlich. (vgl. auch [HOHMANN, 1991])

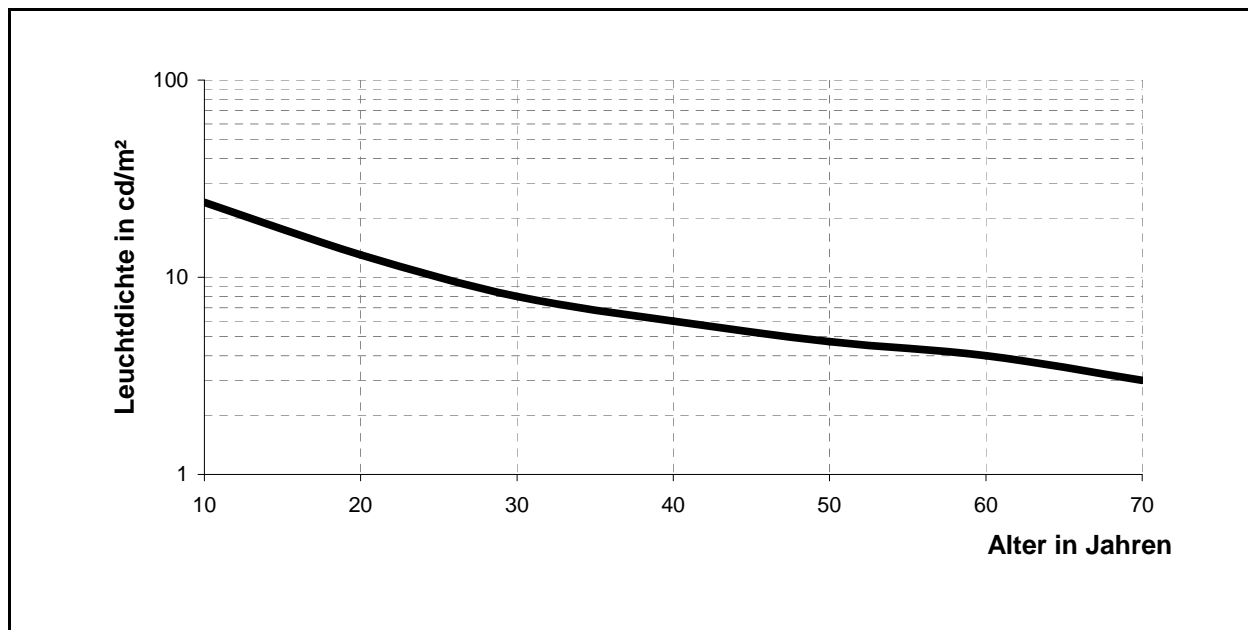


Bild 4-10: Zumutbare Leuchtdichte in Abhängigkeit vom Alter [GRAMBERG-DANIELSEN ET AL., 1984]

Die Pupillenweite eines 30jährigen ist im Mittel 6,6 mm (Durchmesser) groß. Mit zunehmendem Alter nimmt der Durchmesser um etwa 0,052 mm pro Lebensjahr ab. Mit 60 Jahren wird demnach nur noch ein Durchmesser von 3,9 mm erreicht. Die geringere Pupillenweite wirkt sich insbesondere auf die Schärfentiefe⁹ aus. [HESSE ET AL., 1985] TRENDELENBURG (1961) (in [GRAMBERG-DANIELSEN ET AL., 1984]) beschreibt ähnliche Ergebnisse; die Pupillenweite eines 60jährigen ist bei Tag um etwa 35% kleiner als bei einem 20jährigen, bei Dunkelheit ist die Pupille sogar nur halb so groß. In Bild 4-11 ist die Veränderung der Pupillenweite über das Alter für den Zustand Tag (gestrichelte Linie) und den Zustand Dunkelheit (durchgezogene Linie) dargestellt. Demnach ist anzunehmen, dass der ältere Fahrer einen größeren Bereich fixieren muss, um auch den gesamten Straßenraum überblicken zu können und auch die im äußerst peripheren Bereich liegenden Informationen wahrnehmen zu können.

Nach MAZZANTINI und WIRTH (o. J.) (in [GRAMBERG-DANIELSEN ET AL., 1984]) engt sich mit zunehmendem Alter, infolge Pupillenweitenverengung, das Gesichtsfeld ein. Auf der einen Seite stellt das eine Art natürlichen Blendschutz dar, auf der anderen Seite können die Informationen, die sich in der Peripherie der Netzhaut befinden, nicht mehr wahrgenommen werden.

Weiterhin verlängert sich die so genannte Akkomodationszeit. Das ist die Zeit, die das Auge zum „Scharfstellen“ benötigt, um zwischen nahen und fernen Objekten zu wechseln, beispielsweise zwischen dem Tachometer und einem Verkehrszeichen. Nach GRAMBERG-DANIELSEN ET AL. (1984) benötigt ein Fahrer, der jünger als 50 Jahre ist, für einen Wechsel von 20 m auf 0,5 m Entfernung 0,5 bis 0,8 s, ein über 60jähriger Fahrer benötigt dafür 2,0 bis 2,7 s. Diese Zahlen gelten für die Fahrt bei Tageslicht, für die Fahrt bei Dunkelheit wird von einem dreifachen Zeitbedarf ausgegangen. In Tabelle 4.6 sind die während der Akkomodation von 20 m auf 0,5 m Entfernung

⁹ Der Entfernungsbereich, „in dem ein Objekt verschoben werden kann, ohne daß eine Unschärfe wahrgenommen wird“. [HESSE ET AL., 1985]

zurückgelegten Wege für jeweils drei Geschwindigkeitsstufen in Abhängigkeit vom Alter und der Umfeldhelligkeit angegeben. Es ist erkennbar, dass bei Dunkelheit ein älterer Fahrer in etwa einen dreimal so langen Weg zurücklegt, wie ein junger Fahrer.

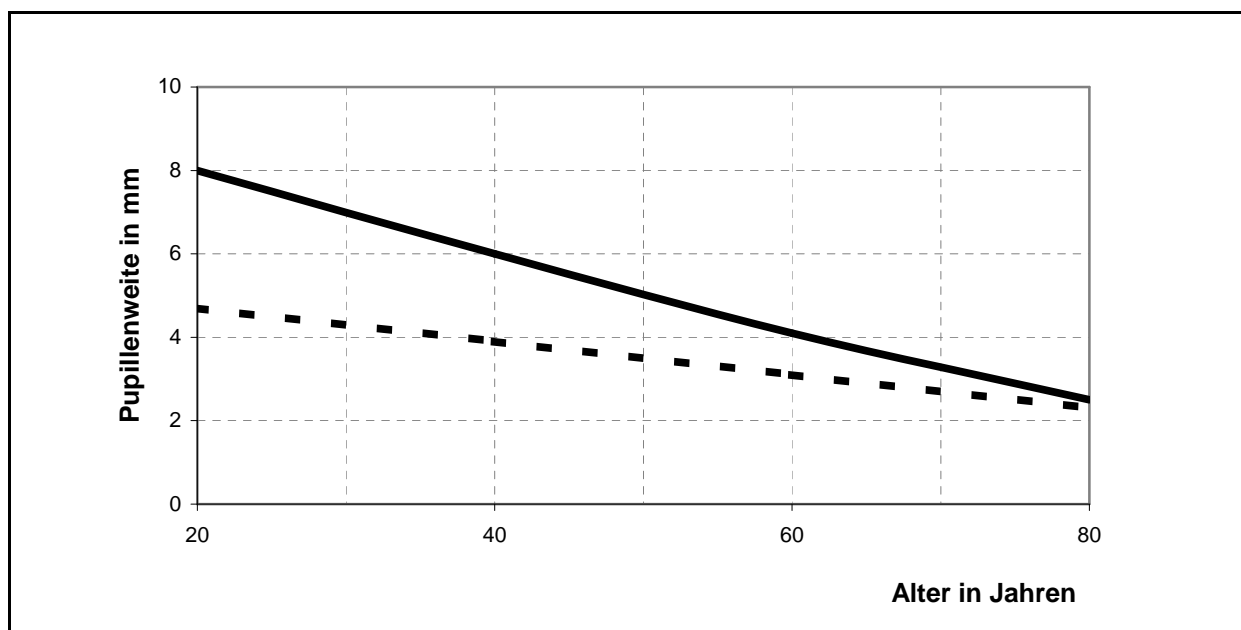


Bild 4-11: Veränderung der Pupillenweite in Abhängigkeit vom Alter für Tag (gestrichelte Linie) und Dunkelheit (durchgezogene Linie) (nach TRENDELENBURG, 1961 in [GRAMBERG-DANIELSEN ET AL., 1984])

Geschwindigkeit	Zurückgelegter Weg für Fahrer < 50 Jahre		Zurückgelegter Weg für Fahrer > 60 Jahre	
	Tag (0,5 s)	Dunkelheit (2,0 s)	Tag (2,0 s)	Dunkelheit (6,0 s)
60 km/h	8,33 m	33,33 m	33,33 m	100 00 m
80 km/h	11,11 m	44,44 m	44,44 m	133,33 m
100 km/h	13,89 m	55,56 m	55,56 m	166,67 m

Tabelle 4.6: Während der Akkomodation von 20 m auf 0,5 m Entfernung zurückgelegte Wege

Auch die Leistungsfähigkeit des Gehirns lässt im Alter nach. Nach MÜLLER-LIMMROTH (1987) werden aufgrund altersbedingter Funktionseinbußen die Hirnzellen nicht mehr ausreichend mit Sauerstoff, Glucose und Aminosäuren versorgt, die Folge ist ein Nachlassen der Leistung. Demnach wird es im Alter immer schwieriger, „Informationen aufzunehmen, wahrzunehmen, zu behalten und in Handlungen umzusetzen“. Nach COHEN (1995) (in [BAGL ET AL., 1999]) benötigt ein 60jähriger Fahrer etwa eineinhalbmals so lange um eine Information von der selben Größe aufzunehmen und zu verarbeiten als ein 20jähriger Fahrer. In der Fachwelt wird vom Apperzeptionsvermögen gesprochen. In Bild 4-12 ist die Veränderung der Verarbeitung von Informationen über das Lebensalter dargestellt. Für die Praxis bedeutet das, dass ein 60jähriger Mensch im Vergleich zu einem 20jährigen bei gleicher Fahrgeschwindigkeit nur 2/3 der Informationen verarbeiten kann oder dass

er seine Geschwindigkeit um $\frac{1}{3}$ reduzieren muss, um genauso viele Informationen verarbeiten zu können wie ein 20jähriger.

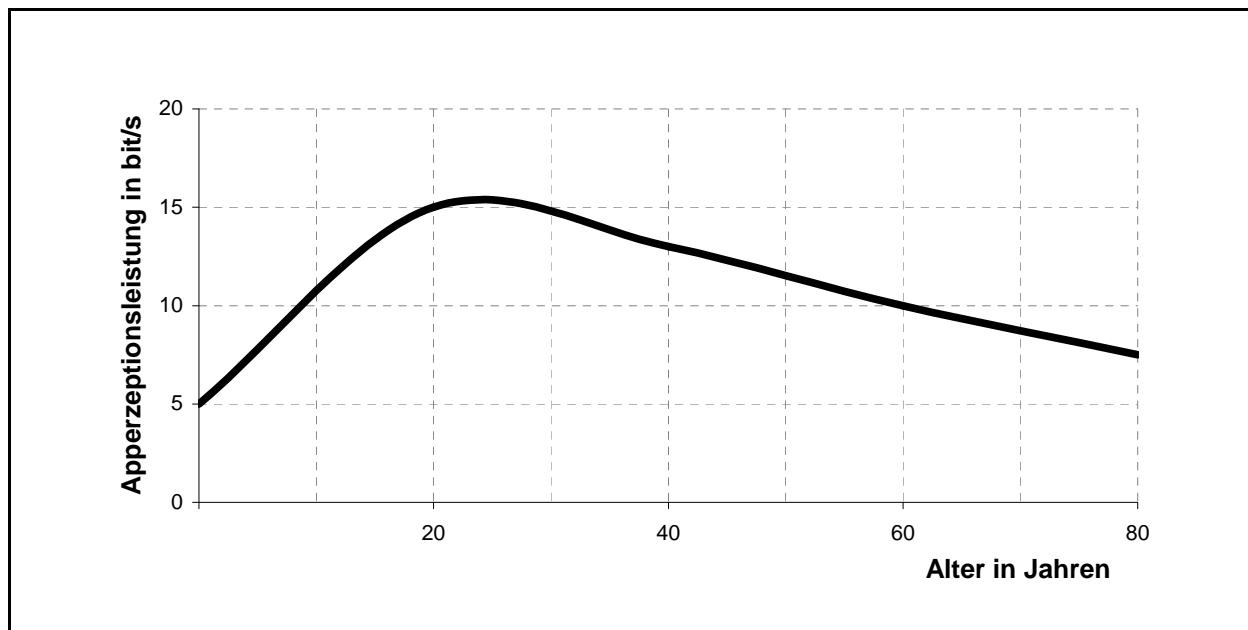


Bild 4-12: Altersabhängigkeit des Apperzeptionsvermögens (nach COHEN, 1995 in [BAGL ET AL., 1999])

Ältere Menschen verarbeiten jedoch nicht nur weniger Informationen in der selben Zeit wie jüngere Menschen, auch der Zeitraum, über den die Informationen im Kurzspeicher abgelegt werden, verkürzt sich. In Bild 4-13 ist zu erkennen, wie die Speicherdauer mit zunehmendem Alter abnimmt. Ein 20jähriger Mensch kann Informationen über annähernd 6,0 s im Kurzspeicher ablegen, für einen 60jährigen Mensch verkürzt sich dieser Zeitraum um rund 25% auf 4,5 s. (RIEDEL, 1981 in [KNOFLACHER, 1987]) Demnach kann davon ausgegangen werden, dass ältere Menschen komplexe Objekte häufiger fixieren müssen, um alle Informationen verarbeiten zu können, als junge Menschen.

Hinsichtlich des getriggerten Blickverhaltens ist bekannt, dass sich infolge Alterung die Saccadengeschwindigkeit nur geringfügig reduziert und die Saccadendauer nur geringfügig verlängert. Jedoch nimmt die Saccadenlatenz¹⁰ deutlich zu, sie verlängert sich um bis zu 20%. Zudem nimmt die Genauigkeit der Saccaden ab, wodurch zusätzliche Korrektursaccaden notwendig werden. Somit können ältere Fahrer im Vergleich zu jüngeren Fahrern weniger Fixationen pro Sekunde ausführen und somit weniger Informationen aufnehmen und verarbeiten. [LACHENMAYR, 1987]

¹⁰ „Saccadenlatenz oder auch saccadische Reaktionszeit ist die Zeit zwischen dem Erscheinen eines Zieles und dem Start der Saccade zum intendierten Ziel.“ [PANNASCH, 2003]

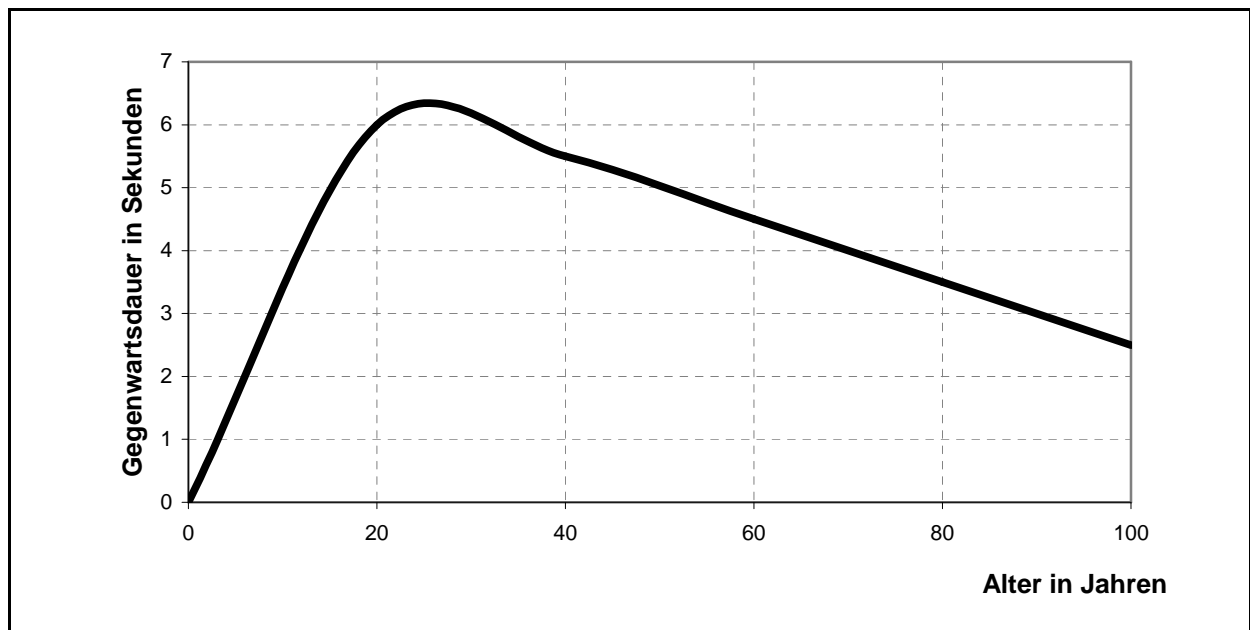


Bild 4-13: Zeitliche Größe des Kurzspeichers in Abhängigkeit vom Alter (nach RIEDEL, 1981 in [KNOFLACHER, 1987])

4.6.2.3 Zusammenfassung

Anhand der Erkenntnisse aus der Literatur wurde deutlich, dass die psychophysischen Veränderungen infolge Alterung einen erheblichen Einfluss auf das gesamte Perception-Modell ausüben.

Mit zunehmendem Alter verschlechtert sich die Sehleistung; die Sehschärfe nimmt ab, die Akkomodation verlangsamt sich, die Blendempfindlichkeit nimmt zu und das Gesichtsfeld engt sich ein. Aufgrund dieser Veränderungen werden relevante Informationen nur unscharf abgebildet, die Wahrnehmungsschwellen erhöhen sich und periphere Informationen werden nur bedingt wahrgenommen. Daher werden die Informationen erst sehr spät gesehen oder auch übersehen. Zudem laufen die zentralen Informationsverarbeitungsprozesse mit geringerer Geschwindigkeit ab. Der ältere Fahrer braucht mehr Zeit, um die Informationen aufzunehmen und zu verarbeiten. Deshalb können ältere Menschen im Vergleich zu jüngeren Menschen nicht alle im Straßenraum vorhandenen Informationen aufnehmen, verarbeiten und entsprechend reagieren. Außerdem kann von einer Verlängerung der Saccadenlatenz und der Ungenauigkeit der Saccaden ausgegangen werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass ältere Fahrer insbesondere in sehr komplexen Situationen, wie beispielsweise in großen Knotenpunkten mit vielen Informationen, überfordert sein können. Die Folge können „Übersehen“ relevanter Informationen oder zu spät bzw. falsch eingeleitete Fahrmanöver sein. Diesen altersbedingten psychophysischen Veränderungen muss bei der Gestaltung des Straßenraums Rechnung getragen werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen der vorliegenden Arbeit, insbesondere das Komplexitätsmodell, stellen einen Beitrag zur Berücksichtigung der altersbedingt veränderten Anforderungen an die Gestaltung des Straßenraums dar.

4.6.3 Fahrerfahrung

4.6.3.1 Allgemeines und Prognosen

Nach LUFF (1988) ist das Erfahrungswissen die Grundlage verkehrsgerechter Information: „Ohne diese Erfahrung, die eine ausreichende Fahrpraxis voraussetzt, wäre er [der Mensch] nicht in der Lage [...] aus der Fülle der insgesamt wahrnehmbaren Signale diejenigen zu selektieren [...] die für die Situationsdiagnostik und damit letztlich für sein Fahrverhalten relevant sind.“

In der Literatur finden sich verschiedene Angaben über Zeiträume, in denen der Mensch seine Fahrerfahrung sammelt. Bezogen auf das gesteuerte Blickverhalten ist nach COHEN (1987a) ein Fahrer auch nach zweijähriger Fahrpraxis „nicht in der Lage, die Information entsprechend der Kurvenrichtung aufzunehmen.“ Er benötigt ca. fünf Jahre, um ein an das Umfeld angepasstes Blickverhalten zu entwickeln. Andere Autoren geben dafür Zahlen von sieben Jahren bzw. 100.000 Kilometern an. ([BAGL ET AL., 1999], [FASTENMEIER, 1994])

Es ist anzunehmen, dass die Fahrerfahrung Einfluss zum Einen auf das gesteuerte Blickverhalten und zum Anderen auf den Prozess der Wahrnehmung nimmt. Hinsichtlich des Blickverhaltens wird vermutet, dass sich infolge langjähriger Erfahrung ein Muster entwickelt hat, wonach der Fahrer die Umgebung nach relevanten Informationen absucht. Zudem kann ein geübter Fahrer sein Fahrzeug ohne Probleme lenken, er fährt „automatisch“. Bezüglich der Wahrnehmung liegt die Vermutung nahe, dass ein praxiserprobter Fahrer relevante Informationen, beispielsweise Verkehrszeichen, aufgrund der charakteristischen Form und dem regelmäßigen Standort eher als solches wahrnimmt, als ein Fahranfänger.

4.6.3.2 Ergebnisse aus der Literatur

Aufgrund der langen Fahrpraxis hat der erfahrene Fahrer bereits ein „Muster“ entwickelt, wie und woran er sich in bestimmten Situationen orientiert. Beispielsweise unterscheidet sich die Lage des fixierten Bereiches ganz offensichtlich zwischen Links- und Rechtskurven. (vgl. Kapitel 4.4.3) Nach COHEN (1987a) hat sich dieses „Blickmuster“ aufgrund der Regelmäßigkeiten der Standorte der Informationen entwickelt. Ein Fahranfänger verfügt allerdings noch nicht über ein derartiges Muster.

Der Fahranfänger unterscheidet sich vom erfahrenen Fahrer in genau den folgenden drei Punkten:

1. Fixationsentfernung,
2. Blickbewegung und
3. Bewertung der Informationen. [COHEN, 1987a]

Ein unerfahrener Fahrer fixiert den Bereich, der sich direkt vor seinem Fahrzeug befindet. Ergo kann er seine Fahrweise aufgrund mangelnder Erfahrung noch nicht planen und legt die Fahrweise von einem zum anderen Zeitpunkt fest. [COHEN, 1987a] Auch nach MOURANT und ROCKWELL (1970, 1972) (in [COHEN, 1986]) sowie nach MOURANT und DONOHUE (1977) (in [FASTENMEIER, 1994]) berücksichtigen Fahranfänger eher die Objekte in der Nähe des Fahrzeugs, erfahrene Fahrer hingegen

beobachten Objekte in der Ferne. Fahranfänger ignorieren zudem eher die peripheren Informationen.

Auch in der Blickbewegung sind Unterschiede zwischen erfahrenen und unerfahrenen Fahrern zu erwarten. Im Gegensatz zum erfahrenen Fahrer führt der unerfahrene relativ große Blickbewegungen durch. Diese großen Blickbewegungen resultieren auch aus der geringeren Entfernung zwischen Auge und Objekt, wodurch größere Blickbewegungswinkel notwendig werden. Mit diesem Verhalten versucht er, so viele Informationen wie möglich zu sammeln, wobei diese allerdings meist nicht in Zusammenhang stehen. [COHEN, 1987a] Auch FASTENMEIER (1994) wies nach, dass erfahrene Fahrer über die „besten und effektivsten Blickstrategien“ verfügen, was er insbesondere bei der Informationssuche sowie beim „sichernden“ Verhalten (Blick in die Fahrzeugspiegel) beobachten konnte. Auch er beschreibt, dass die unerfahrenen Fahrer (bis 25 Jahre) zu einem Blickverhalten neigen, welches mit ineffektiven Suchaktivitäten beschrieben werden kann. Die älteren Fahrer (ab 60 Jahre) hingegen reduzieren ihr Blickverhalten auf das für sie „notwendige“ Maß, sie bevorzugen den direkten Blick nach vorn. Nach DILLING (1973) (in [BERGER, 1993]) „schweifen“ Fahranfänger über einen weiten Bereich des Fahrtraums umher, wobei sie im Durchschnitt kürzere Fixationszeiten und größere Blickwinkeländerungen als erfahrene Fahrer aufweisen. Zudem wechseln sie häufig zwischen nah und fern und „suchen“ ständig nach Informationen. Zusammengefasst kann gesagt werden, dass Fahranfänger ein unausgeglichenes Blickverhalten vorweisen.

Des Weiteren kann ein unerfahrener Fahrer aufgrund mangelndem Wissen die aufgenommenen Informationen noch nicht so effektiv bewerten wie der erfahrene Fahrer. COHEN (1987a) untersuchte dazu in den 1980er Jahren, wie sich die Fahrerfahrung auf die Anzahl der identifizierten Signale auswirkt. Dabei konnte er unter anderem ermitteln, dass die erfahrenen Fahrer durchschnittlich etwa 73,6% der Signale identifizierten. Zudem fand er heraus, dass bei Darbietung von Signalen in Richtung Peripherie weniger Signale identifiziert wurden, wobei die Reaktionszeit auf das Signal anstieg. Für die Gruppe der unerfahrenen Fahrer wurde deutlich, dass sie trotz erhöhter Aufmerksamkeit weitaus weniger Signale bei auffallend längeren Reaktionszeiten identifizierten. COHEN (1984) (in [BAGL ET AL., 1999]) zog daraus folgenden Schluss: „Eine gleich hohe Informationsdichte stellt für den unerfahrenen Lenker also eine ungleich größere Belastung dar als für den geübten Fahrer, der in solchen Situationen auch emotional viel ausgeglichener reagieren können sollte.“

Nach COHEN (1986) nimmt mit zunehmender Fahrpraxis auch die Beanspruchung des Fahrers durch Signale aus der Umwelt ab. Begründet wird dies durch die Entwicklung eines Systems von kategoriellen Codes. Mithilfe von diesem System kann der erfahrene Fahrer relativ schnell die Eigenschaften der Umwelt „im Sinne von Verbindungen, Redundanzen, räumlichen Verhältnissen etc.“ wahrnehmen. Aufgrund der komprimierten Information wird der erfahrene Fahrer folglich weniger stark beansprucht als der unerfahrene Fahrer. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass bei ausreichender Fahrpraxis die Aufmerksamkeit vermehrt den dynamischen Objekten zugewendet wird, zum Nachteil der statischen Objekte.

4.6.3.3 Zusammenfassung

Die vermuteten Einflüsse der Fahrerfahrung auf das Blickverhalten und die Wahrnehmung konnten durch die Erkenntnisse aus der Literatur weitgehend bestätigt werden. Verschiedene Autoren haben das Blickverhalten in Abhängigkeit von der Fahrerfahrung untersucht. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Fahranfänger im Vergleich zum erfahrenen Fahrer ein eher „unausgeglichenes“ Blickverhalten aufweisen. Zum Einen fixieren Fahranfänger die Bereiche, die sich direkt vor dem Fahrzeug befinden, ein vorausschauendes Fahren ist somit nicht möglich. Zum Anderen wird der gesamte Straßenraum mit großen Blickbewegungssprüngen abgescannt, was eher einem ineffektiven Suchen nach Informationen gleicht. Aufgrund der Fahrpraxis, entwickeln sich allerdings Blickbewegungsmuster, die auf die „Regelmäßigkeit der Standorte der Informationen“ zurückzuführen sind. Aus Untersuchungen zur Wahrnehmung in Abhängigkeit von der Fahrerfahrung konnte nachgewiesen werden, dass erfahrene Fahrer weitaus mehr relevante Informationen wahrnehmen als unerfahrene Fahrer. Eine Erklärung liefert die Beanspruchung des Fahrers infolge hoher Informationsdichten. Demnach kann ein erfahrener Fahrer aufgrund seines Wissens (beispielsweise werden immer wiederkehrende Situationen nach bestimmten Mustern komprimiert und codiert abgelegt) die relevanten Informationen schneller als solche wahrnehmen und er wird daher weniger beansprucht als ein unerfahrener Fahrer, der für die Wahrnehmung der Situation einen längeren Zeitraum benötigt.

4.7 Fahrerspezifische Einflüsse - Kurzfristig wirkende Variablen

4.7.1 Visuelle Beanspruchung/Belastung

4.7.1.1 Allgemeines und Prognosen

Nach KÜTING (1976) (in [GOTTLIEB, 1981]) ist Belastung die „Gesamtheit der von außen auf den Organismus wirkenden Reize“ und Beanspruchung die „Wirkung der Belastung auf den Organismus, wobei individuelle, spezifischen Eigenschaften mitbeteiligt sind“. Die Beanspruchung ist demnach eine Funktion der Belastung und der individuellen Eigenschaften.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der visuellen Belastung des Fahrers infolge zahlreicher visueller Reize, wie sie beispielsweise in sehr komplexen Straßenraumsituationen vorkommen. Es wird aber darauf hingewiesen, dass auch andere Reize der Fahrer belasten und somit der Prozess der Wahrnehmung beeinflusst werden kann, beispielsweise durch auditive Reize wie ein Gespräch mit dem Beifahrer.

Es wird vermutet, dass bei hoher visueller Belastung (große Anzahl visueller Reize):

- sich der Fixationsbereich vergrößert, um alle Informationen aufnehmen zu können,
- sich die Fixationszeiten verkürzen, um die Zahl der aufgenommenen Informationen zu erhöhen,
- größere Blickwinkeländerungen auftreten, da die Informationen über einen größeren Bereich im Straßenraum verteilt sind und
- die peripheren Wahrnehmungsschwellen ansteigen, da aufgrund der Belastung die Hauptaufmerksamkeit auf die fovealen Objekte gelegt wird.

Bei unerfahrenen Fahrern wird dieses Blickverhalten besonders stark ausgeprägt sein. (vgl. Kapitel 4.6) Des Weiteren ist anzunehmen, dass aufgrund der kurzen Fixationszeiten die Wahrnehmung der Informationen eingeschränkt ist. Werden Informationen kürzer als 80 bis 100 ms fixiert, können die Informationen nicht bewusst verarbeitet werden. (YOUNG ET AL, 1975 in [SCHWEIGERT, 2003], [BUBB, 2000])

4.7.1.2 Ergebnisse aus der Literatur

Nach LUFF (1988) kann das Führen von Kraftfahrzeugen als eine häufige „Umstellung auf wechselnde Situationen in kürzester Zeitfolge“ bezeichnet werden. Demnach werden durch die entstehenden Belastungssituationen die Belastbarkeitsgrenzen des Fahrers tangiert oder auch überschritten. Dabei haben aber auch die psychophysischen Leistungsfähigkeit, die Fahrerfahrung und die Motivation des Fahrers einen entscheidenden Einfluss.

Aus den Untersuchungen von UNDEUTSCH (1963) (in [SCHNEIDER ET AL., 1995]) wurde deutlich, dass die „normale Fahrtätigkeit den Fahrer voll beansprucht, so daß selbst so geringe zusätzliche Belastungen, wie sie das Nennen von geläufigen Verkehrszeichen, die ohnehin beachtet werden müssen, darstellt, ihn in gefährlicher Weise verunsichert.“

Nach MACKWORTH (1965, 1976) (in [COHEN 1987b]) engt sich das nutzbare Sehfeld mit zunehmender Belastung durch Informationen ein. Demnach verringert sich bei Belastung der Fixationsbereich, der Effekt des „Tunnelsehens“ tritt ein. Auch COHEN (1984) (in BAGL ET AL., 1999]) konnte diese Entwicklung beobachten. Demnach kann die Einengung des Sehfeldes als Folge des Überschreitens der Verarbeitungskapazität gesehen werden. Er beschreibt, dass die beste Möglichkeit, um aus dem Kreislauf auszubrechen, eine Verringerung der Geschwindigkeit ist. COHEN (1987b) konnte nachweisen, dass die Informationsbelastung im komplexen Stadtverkehr höher ist als auf einer monotonen Autobahn. Das nutzbare Sehfeld schränkte sich auf der Autobahnfahrt nicht ein, jedoch während der Stadtfahrt. Dabei wird aufgrund der hohen Informationsbelastung der Schwerpunkt der Aufmerksamkeit auf das Sehfeldzentrum gelegt. LUFF (1988) widerspricht allerdings diesem Zusammenhang und weist auf eine falsche Interpretation der Ergebnisse hin. Demnach kann „die Leistung in einer Nebenaufgabe als Funktion der Beanspruchung in einer Hauptaufgabe eingeschränkt werden“. Es ist allerdings nicht nachvollziehbar, welche „Reize in welcher Exzentrizität trotz Beanspruchung noch relevant genug sind, um geortet zu werden.“ Nach LUFF (1988) haben Sehen, Wahrnehmen und Erkennen noch stattgefunden, nur die Beantwortung des Reizes erfolgte aufgrund der Beanspruchung nicht.

Nach ZEEMAN (1976) (in [COHEN, 1986]) verlagert der Fahrer bei zunehmender Beanspruchung seine Aufmerksamkeit auf relevante Objekte. Nicht-relevante Objekte werden demnach vernachlässigt. Aufgrund dieser Einschränkung kann die Umwelt intern bestmöglich repräsentiert werden, wobei diese nur begrenzt dargestellt wird. In der Folge kann der Fahrer beispielsweise seine Geschwindigkeit nicht mehr richtig einschätzen.

Bezogen auf die Fixationszeiten wurden gegenteilige Ergebnisse in der Literatur gefunden. Einerseits konnten RAYNER (1998) (in [PANNASCH, 2003]) und COHEN (1987a) nachweisen, dass mit zunehmender Schwierigkeit der Aufgabe und somit wachsender Beanspruchung sich die Fixationszeiten verlängern. Andererseits wiesen

verschiedene Autoren nach, dass für Aufgaben, die schnelles Reagieren erfordern, wie beispielsweise Fahr- und Flugmanöver, mit zunehmender Beanspruchung sich die Fixationszeiten verkürzen. (GERATHEWOHL ET AL., 1978; MIURA, 1986; UNEMA und RÖTTING, 1990 alle in [PANNASCH, 2003], [BUBB, 2000]) Auch SCHWEIGERT (2003) konnte nachweisen, dass unter Beanspruchung durch eine visuelle Zusatzaufgabe sich die mittleren Fixationsdauer um ca. 26% verringert. Demnach versuchten die Probanden durch Beschränkung der Fixationsdauer, Zeit für die Nebenaufgaben zu gewinnen. Bei Beanspruchung durch eine auditive Zusatzaufgabe konnte allerdings ermittelt werden, dass der Großteil der Probanden zu einem starren Blickverhalten neigte, wodurch sich die Fixationsdauer (Fahrbahn, vorausfahrende Fahrzeuge) um bis zu 50% verlängerte.

COHEN (1986) konnte weiterhin ermitteln, dass bei zunehmender Belastung des Fahrers ein Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und mittlerer Fixationszeit besteht. „Je länger die mittlere Fixationszeit war, um so langsamere Geschwindigkeiten wählte die Vp.“ Nach COHEN (1986) und nach LIEDEMIT (1977) (in [COHEN, 1986]) kompensiert der Fahrer durch Verlangsamung der Geschwindigkeit die begrenzte Verarbeitungskapazität.

MÜLLER-LIMMROTH (1987) berichtet, dass bei hoher Belastung des Menschen die Hirnrinde überregt wird, wodurch sich die Bewertung der Informationen verfälscht und Fehlhandlungen möglich werden. Beispielsweise konnte nachgewiesen werden, dass sich Musik im Fahrzeug in besonders schwierigen Verkehrssituationen belastend auswirken kann.

4.7.1.3 Zusammenfassung

Die Aussagen aus der Literatur zeigen, dass der Einfluss der Belastung infolge visueller Reize weiterer Forschung bedarf. Einerseits konnte die Einengung des nutzbaren Sehfeldes nachgewiesen werden, andererseits wird dieser Aussage widersprochen. Auch die Ergebnisse, die verschiedene Untersuchungen hinsichtlich der Fixationszeiten erzielten, sind widersprüchlich. Einerseits wurde eine Verkürzung der Fixationszeiten nachgewiesen, andererseits konnten längere Fixationszeiten ermittelt werden. Auch wenn keine Aussagen bezüglich der Auswirkungen auf die peripheren Wahrnehmungsschwellen gefunden werden konnten, wird davon ausgegangen, dass diese bei hoher Beanspruchung/Belastung physiologisch ansteigen. Demnach wird das getriggerte Blickverhalten beeinflusst, da die Wahrscheinlichkeit einer reflektorische Blickzuwendung mit steigender Beanspruchung/Belastung sinkt (bei gleich bleibendem Leuchtdichte- oder Farbkontrast eines Objektes). Über den Einfluss von Belastung auf die Verarbeitung der Informationen wurde herausgefunden, dass Belastung aufgrund der Überregung der Hirnrinde zu falschen Bewertungen und somit zu Fehlhandlungen führen kann.

Um weitere Hinweise über den Einfluss der Belastung infolge visueller Reize im Straßenverkehr zu gewinnen, wird im Rahmen dieser Arbeit auch dieser Punkt untersucht. (vgl. Kapitel 5.4.2 und 5.6)

4.7.2 Müdigkeit

4.7.2.1 Allgemeines und Prognosen

Müdigkeit hat einen großen Einfluss auf die im gesamten Organismus ablaufenden Prozesse. Diese verlangsamen sich oder laufen teilweise verändert oder ungenau ab. Die Wachheit des Menschen wird vom Biorhythmus gesteuert, der wiederum eng mit dem Tageslicht verbunden ist. (vgl. Kapitel 4.3.1)

Bezogen auf das gesteuerte aber auch das getriggerte Blickverhaltens wird vermutet, dass infolge Müdigkeit sich die Fixationszeiten verlängern, die Saccadengeschwindigkeiten verlangsamen und die Genauigkeit der Saccaden sinkt. Die Folge ist eine geringere Anzahl fixierter Objekte und damit ein Übersehen relevanter Informationen. Des Weiteren ist anzunehmen, dass mit zunehmender Müdigkeit die Zahl der verarbeiteten Informationen sinkt. Die Folge ist auch hier ein Verlust an Informationen und somit eine unvollständige Übersicht der Verkehrssituation.

4.7.2.2 Ergebnisse aus der Literatur

Nach GALLERY (1988) (in [KUHL, 2006]) kann mit zunehmender Müdigkeit ein „Übergang vom aktiven, vorausschauenden Blickverhalten zu einem passiven Blickverhalten, welches von visuellen Reizen geleitet wird“ beobachtet werden. Es werden also vermehrt die Bereiche fixiert, die direkt vor dem Fahrzeug liegen, vergleichbar mit dem Blickverhalten von Fahranfängern. Des Weiteren wurde eine verlängerte mittlere Fixationszeit beobachtet, was mit der verlangsamen und ineffizienten Informationsaufnahme begründet wurde. (vgl. auch [COHEN, 1976]) Zudem konnte REITTER (2001) im Rahmen seiner Dissertation nachweisen, dass aufgrund von Ermüdung:

- sich die Anzahl der Saccaden vermindert,
- die Saccadengeschwindigkeit abnimmt,
- sich die Saccadenamplitude vergrößert,
- sich die Saccadendauer verlängert und
- sich die Anzahl der überlangen Fixationsdauer (> 600 ms) erhöht.

Aus diesen Ergebnissen ist zu schließen, dass aufgrund von Müdigkeit weniger Objekte fixiert und somit wahrgenommen und verarbeitet werden können.

Nach WILHELM und WILHELM (1995) hat die Müdigkeit aber nicht nur auf das Blickverhalten, sondern auch auf das Sehen einen entscheidenden Einfluss. Genauer gesagt wird das Verhalten der Pupillen durch die Müdigkeit beeinflusst. Bei einem wachen Menschen bleibt die Pupille bei Dunkelheit nach einer zwei- bis dreiminütigen Aufweitung weitgehend konstant geöffnet, es treten nur sehr geringe Schwankungen ($\pm 0,2$ mm) auf. Bei müden Menschen hingegen verengt sich im Dunkeln die Pupille innerhalb der ersten fünf Minuten und beginnt danach, vermehrt zu schwingen. Aufgrund des zu geringen Öffnungswinkels kann nicht ausreichend Licht ins Auge fallen, die Folge ist eine zu geringe Kontrastrepräsentation. Infolgedessen können Objekte, die sich nur schwach vom Hintergrund abheben, nicht mehr gesehen und wahrgenommen werden.

Weiterhin verändert sich nach MEINOLD (2005) infolge Müdigkeit der Lidschlag in Häufigkeit und Dauer. STERN ET AL. (1984) (in [MEINOLD, 2005]) gehen von einer Lidschlagdauer von 150 bis 250 ms aus. Dabei ist für das Sehen insbesondere die Pupillenverschlusszeit relevant, die in etwa 50 bis 120 ms andauert. Infolge von Müdigkeit werden diese Zeiten verlängert, Lidschläge von über 300 ms können auftreten. Auch HABERICH (1962) (in [GRAMBERG-DANIELSEN ET AL. 1984]) berichtet, dass infolge Müdigkeit die Lidschlagdauer 300 bis 400 ms betragen kann. Das bedeutet, dass infolge Müdigkeit eine längere Strecke „blind“ durchfahren wird. Demnach ist auch hier mit einem Verlust von Informationen zu rechnen. Zudem sinkt mit zunehmender Müdigkeit die Lidschlagrate, das heißt die Häufigkeit der Lidschläge pro Zeiteinheit. Genaue Zahlen zur Lidschlagrate können allerdings nicht gegeben werden, da diese zum Einen sehr individuell ist, zum Anderen auch von der zu bewältigenden Aufgabe abhängt.

MÜLLER-LIMMROTH (1987) berichtet, dass infolge Müdigkeit die Leistungsfähigkeit des Gehirns und somit auch die Wahrnehmungs- und Handlungsfähigkeit der Person eingeschränkt ist. Die Signale aus der Umwelt werden zwar noch erfasst, führen jedoch nicht mehr zur Information und somit auch nicht zu den erforderlichen Handlungen. HUNTLEY und CENTYBEAR (1974) (in [COHEN, 1986]) schließen anhand ihrer Untersuchungen auf einen geringen Einfluss der Müdigkeit auf die Wahrnehmung. Dieses Ergebnis ist jedoch sehr fragwürdig. Die kurze Versuchsdauer lässt vermuten, dass die Versuchspersonen trotz Müdigkeit ihre Reserven für diesen kurzen Zeitraum mobilisieren konnten und daher die Fahraufgabe fast fehlerfrei absolvierten. Diese Erhöhung der Aufmerksamkeit, um die Beeinträchtigung auszugleichen, ist jedoch zeitabhängig und kann nur für einen kurzen Zeitraum aufrecht erhalten werden. Daher wird vermutet, dass insbesondere bei längeren Zeitdauern der Einfluss der Müdigkeit auf die Wahrnehmung und somit die Bewältigung der Fahraufgabe enorm ist.

4.7.2.3 Zusammenfassung

Anhand der in der Literatur getroffenen Aussagen konnten die Annahmen hinsichtlich des Einflusses der Müdigkeit auf den gesamten Wahrnehmungsprozess weitgehend bestätigt werden. Infolge Müdigkeit kann also von einem verlangsamten Blickverhalten (längere Fixations- und Saccadendauern, geringere Anzahl an Saccaden, verlangsamte Saccadengeschwindigkeiten und verkürzte Fixationsentfernungen) ausgegangen werden. Neben dem Blickverhalten wird auch der Lidschlag verändert. Verschiedene Untersuchungen zeigten, dass sich infolge von Müdigkeit die Lidschlagdauer sowie deren Rate erhöhten, wodurch ein Verlust von Informationen bereits auf der Stufe der Informationsaufnahme auftreten kann. Aber auch der Einfluss auf die Informationsverarbeitung wurde in verschiedenen Untersuchungen geprüft. Aufgrund der Einschränkung der Leistungsfähigkeit des Gehirns kann von einer eingeschränkten Informationsverarbeitung ausgegangen werden.

4.8 Zusammenfassung

Die vorangegangenen Kapitel liefern einen Überblick über die wichtigsten Parameter und deren Einflüsse auf die Teilmodelle des Perception-Modells. In Bild 4-14 ist das Perception-Modell, die verschiedenen Einflusskategorien sowie deren Zusammen-

hänge und das Komplexitätsmodell dargestellt. Ein ausführliches Modell ist im Anhang, Kapitel A4 gezeigt.

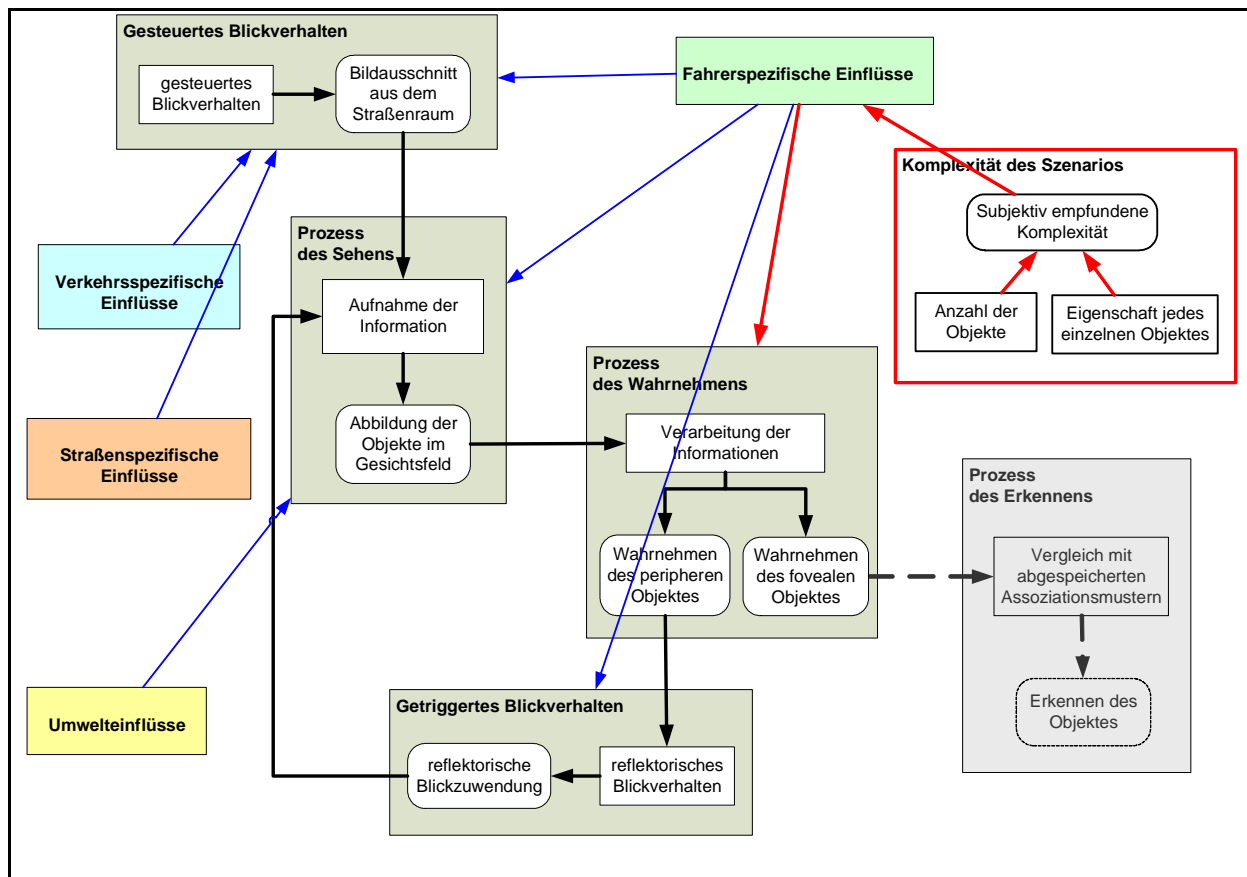


Bild 4-14: Das Perception-Modell und die Einflüsse aus den verschiedenen Kategorien sowie Darstellung eines vereinfachten Komplexitätsmodells

Die **Umwelteinflüsse**, zu denen die Umfeldhelligkeit und die widrigen Sichtverhältnisse (Nebel, Sonnenblendung) zählen, wirken sich insbesondere auf den Prozess des Sehens, den Prozess der Wahrnehmung sowie das gesteuerte Blickverhalten aus. Bei Dunkelheit sinkt die Sehschärfe, nach Angaben aus der Literatur, bis auf einen Wert von 5% ab. Objekte werden nicht mehr scharf abgebildet und somit nicht gesehen, nicht wahrgenommen und nicht erkannt. Auch die unscharfe Abbildung der Objekte auf der Netzhaut infolge Nebel wird mit der Verminderung der Sehschärfe verglichen. Bei Blendung hingegen erzeugt das einfallende Licht eine erhöhte Schleierleuchtdichte im Auge, wodurch der Bildkontrast des Objektes auf dem Netzhautbild herabgesetzt wird. Demnach können die Objekte nicht mehr gesehen und wahrgenommen werden. Der tageszeitliche Einfluss auf den Biorhythmus und somit die Leistungsfähigkeit der Informationsaufnahme und -verarbeitung bestätigte sich nur teilweise. Aufgrund der eingeschränkten Sicht und der geringen Anzahl an Informationen bei Nebelfahrten, kann allerdings die Müdigkeit des Fahrers ansteigen, wodurch die Leistungsfähigkeit des Fahrers herabgesetzt wird. Zudem verlagern und vergrößern sich mit abnehmender Helligkeit sowie bei Nebel die fixierten Bereiche, die Fixationsentfernung verkürzt sich. Auch wenn keine Auswirkungen auf das getriggerte Blickverhalten beschrieben wurden, ist davon auszugehen, dass infolge Nebel oder Blendung die peripheren Wahrnehmungsschwellen unterschritten

werden und somit Informationen nicht wahrgenommen werden können und demnach verloren gehen. (vgl. Kapitel 3.4.2)

Die **Straßenspezifischen Einflüsse**, zu denen der Querschnitt der Straße, die Lage der Straße und deren Linienführung gehören, nehmen insbesondere Einfluss auf das gesteuerte Blickverhalten. Für breite Querschnitte bildet sich ein größerer fixierter Bereich aus als für schmale Querschnitte, wobei sich in breiten Querschnitten (mehrspurige Fahrbahnen) mehrere Fixationsbereiche ausbilden können. Aufgrund der Verteilung der Informationen im Straßenraum und der vorherrschenden Verkehrskonstellation ist der fixierte Bereich auf Innerortsstraßen größer als auf Außerortsstraßen. In Kurven verkürzt sich im Gegensatz zur Geraden die Fixationsentfernung, was in der Straßengeometrie begründet liegt. Zudem verlagert sich der Fixationsbereich, was auf die Verteilung der zur Führung und Stabilisierung des Fahrzeugs benötigten Informationen zurückgeführt wird.

Die Verkehrsstärke und die gefahrene Geschwindigkeit werden der Kategorie **Verkehrsspezifische Einflüsse** zugeordnet. Beide Parameter beeinflussen das gesteuerte Blickverhalten. Demnach vergrößert sich der fixierte Bereich mit zunehmender Verkehrsstärke und die Fixationsdauer verringert sich. Verschiedene Literaturquellen zeigten, dass sich mit zunehmender Geschwindigkeit die Fixationsentfernung vergrößert und die Größe des Sehfeldes abnimmt (Tunnelblick). Da die Aussagen dazu teils widersprüchlich sind, sollte dieser Einflussparameter weiter untersucht werden.

Die **Fahrerspezifischen Einflüsse** gliedern sich in langfristig und kurzfristig wirkende Variablen. Zu den **langfristig wirkenden Variablen** zählen das Geschlecht, das Alter und die Fahrerfahrung. Das Geschlecht betreffend konnte kein direkter Einfluss auf die Teilmodelle gefunden werden. Die Unterschiede sind eher in der Fahrleistung, der Geschwindigkeit und der Risikobereitschaft zu finden, so dass das Geschlecht nur einen sekundären Einfluss auf das Perception-Modell ausübt. Das Alter des Fahrers hingegen hat einen erheblichen Einfluss auf das gesamte Perception-Modell. Mit zunehmendem Alter verschlechtert sich die Sehleistung und die zentralen Informationsverarbeitungsprozesse laufen langsamer ab, demnach können relevante Informationen übersehen werden und es wird mehr Zeit benötigt, um sie zu verarbeiten. Zudem verlängert sich die Saccadenlatenz und die Ungenauigkeit der Saccaden steigt an, wodurch die Anzahl der fixierten Objekte sinkt. Aufgrund des Informationsverlustes steigt die Wahrscheinlichkeit von Fahrfehlern und die Verkehrssicherheit wird gefährdet. Die Fahrerfahrung beeinflusst in erster Linie das gesteuerte Blickverhalten. Zudem konnte ein sekundärer Einfluss auf die Wahrnehmung nachgewiesen werden. Fahranfänger weisen im Vergleich zum erfahrenen Fahrer ein eher „unausgeglichenes“ Blickverhalten auf. Sie fixieren die Bereiche direkt vor dem Fahrzeug und sie scannen den gesamten Straßenraum mit großen Blickbewegungssprüngen ab. Zudem nehmen sie weniger relevante Informationen auf als erfahrene Fahrer, was auf die höhere Beanspruchung des Fahrers aufgrund von fehlendem Wissen zurück zu führen ist. Zu den **kurzfristig wirkenden Variablen** zählen die Beanspruchung/Belastung und die Ermüdung. Im Hinblick auf die Beanspruchung/Belastung des Fahrers und deren Einfluss auf die Teilmodelle Prozess des Sehens und gesteuertes Blickverhalten sind in der Literatur widersprüchliche Aussagen zu finden. Auch wenn keine Aussagen bezüglich der Auswirkungen auf die peripheren Wahrnehmungs-

schwellen gefunden werden konnten, wird davon ausgegangen, dass diese bei hoher Beanspruchung/Belastung ansteigen und somit das getriggerte Blickverhalten beeinflusst wird. Periphere Objekte können nicht oder nur eingeschränkt wahrgenommen werden. Es wird vorgeschlagen, auch die Auswirkungen dieses Einflussparameters auf die oben beschriebenen Teilmodelle weiter zu untersuchen. In Bezug auf den Prozess der Wahrnehmung konnte ermittelt werden, dass hohe Beanspruchung/Belastung zu falschen Bewertungen und somit auch zu Fehlhandlungen führen kann. Die Müdigkeit des Fahrers nimmt insbesondere Einfluss auf das Blickverhalten und auf den Prozess der Wahrnehmung. Das Blickverhalten verlangsamt sich, wodurch weniger Informationen fixiert und somit verarbeitet werden können. Auch der Lidschlag verändert sich in Dauer und Rate, wodurch Informationen bereits im Prozess des Sehens verloren gehen können. Aufgrund der Erschlaffung der Ringmuskeln im Auge können insbesondere bei Dunkelheit Fehlwahrnehmungen auftreten. Zudem ist die Leistungsfähigkeit des Gehirns eingeschränkt, wodurch weniger Informationen verarbeitet werden können und somit verloren gehen.

Im Hinblick auf das Thema dieser Arbeit wird zusammenfassend deutlich, dass aufgrund einer Vielzahl an Informationen, insbesondere der visuellen, die Belastung des Fahrers ansteigt. Es wird angenommen, dass mit zunehmender Belastung des Fahrers auch die subjektiv empfundene Komplexität ansteigt. Je höher die subjektiv empfundene Komplexität ist, desto höher ist die Beanspruchung des Fahrers und desto einschneidender auch der Einfluss auf das Perception-Modell. Aber wie kann die subjektiv empfundene Komplexität beschrieben werden? Es wird vermutet, dass die Komplexität zum Einen von der Anzahl der Objekte und zum Anderen von den Eigenschaften eines jeden einzelnen Objektes bestimmt wird. Im folgenden Abschnitt der Arbeit wird zunächst die subjektiv empfundene Komplexität für verschiedene Straßenraumszenarien ermittelt. Des Weiteren werden erste Voruntersuchungen zum Einfluss der subjektiv empfundenen Komplexität auf die Wahrnehmbarkeit von Verkehrszeichen und somit auf die Beanspruchung des Fahrers durchgeführt. Im Anschluss daran wird das Modell zur Beschreibung der subjektiv empfundenen Komplexität entwickelt, welches die Grundlage einer Checkliste zur Prüfung der Genehmigung nicht-relevanter Objekte darstellt.

5 Die Untersuchungen

5.1 Beschreibung des Untersuchungsumfangs

5.1.1 Allgemeines

Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit ist der Einfluss des Straßenumfeldes auf die subjektiv empfundene Komplexität am Beispiel der Bundesautobahnen. Zudem wird der Einfluss der Komplexität auf die Wahrnehmung von Verkehrszeichen und somit auf die Beanspruchung des Fahrers geprüft.

Die psychophysischen Untersuchungen gliedern sich in zwei aufeinander folgende Abschnitte, im ersten Untersuchungsabschnitt (UAI) werden die Straßenszenarien hinsichtlich ihrer visuellen Komplexität klassifiziert. Im zweiten Untersuchungsabschnitt (UAII) wird der Einfluss der Komplexität des Umfeldes auf die Wahrnehmung von Verkehrszeichen untersucht.

Blickverhaltensuntersuchungen werden nur vereinzelt durchgeführt. Die Ergebnisse dienen der Interpretation und Überprüfung der in den psychophysischen Untersuchungen erzielten Ergebnisse. Anhand des Vergleichs zwischen freiem Feld und Lichtlabor werden die Unterschiede hinsichtlich des Blickverhaltens zwischen diesen beiden Zuständen deutlich. Daraus können Hinweise zur Übertragbarkeit der im Lichtlabor ermittelten Ergebnisse erarbeitet werden.

5.1.2 Die Straßenszenarien

Während nächtlicher Fahrten auf deutschen Bundesautobahnen (BAB) wurden über 800 Fotos der vorkommenden Situationen aufgenommen. Zu den untersuchten Bundesautobahnabschnitten zählen:

- die BAB 3 zwischen Wallau und Frankfurt/a. M.,
- die BAB 4 zwischen Bad Hersfeld und Dresden,
- die BAB 5 zwischen Frankfurt/a. M. und Karlsruhe,
- die BAB 60 zwischen Bischofsheim und Rüsselsheim,
- die BAB 66 zwischen Frankfurt/a. M. und Wiesbaden,
- die BAB 67 zwischen Rüsselsheim und Darmstadt sowie
- die BAB 671 zwischen Wiesbaden und Bischofsheim.

Bei der Auswertung der Fotos wurde deutlich, dass sich die aufgenommenen Straßenraumszenarien hinsichtlich Anzahl, Größe und Anordnung der sichtbaren relevanten und nicht-relevanten Informationen unterscheiden lassen. Es konnten vier verschiedene Kategorien mit differierenden Merkmalsausprägungen identifiziert werden, die in der folgenden Tabelle 5.1 beschrieben und beispielhaft dargestellt sind.





Kategorie und Merkmalsausprägungen	Beispiele
<p>A</p> <p>Keine nicht-relevanten Informationen vorhanden</p>	
<p>B</p> <p>Die nicht-relevanten Informationen sind nur vereinzelt auf der linken und/oder rechten Straßenseite sichtbar.</p> <p><i>Beispielsweise einzelne Logos von Tankstellen, Hotels, Fast-Food-Restaurants usw., einzelne angestrahlte Objekte</i></p>	
<p>C</p> <p>Die nicht-relevanten Informationen sind gruppiert auf der linken oder rechten Straßenseite sichtbar.</p> <p><i>Beispielsweise mehrere Logos, gesamte Tankstellenkomplexe, linienförmige Beleuchtung, mehrere angestrahlte Objekte</i></p>	
<p>D</p> <p>Die nicht-relevanten Informationen sind gruppiert auf beiden Straßenseiten sichtbar.</p> <p><i>Beispielsweise beiderseitige Raststätten oder Industriegebiete oder Bebauung, Autobahnen im städtischen Ambiente (Stadtautobahnen)</i></p>	

Tabelle 5.1: Beschreibung der einzelnen Kategorien der Straßenraumszenarien

5.2 Beschreibung des Lichtlabors

5.2.1 Allgemeines

In Bild 5-1 ist der Versuchsaufbau des Lichtlabors schematisch dargestellt. Der Versuchsraum wurde entsprechend der erforderlichen Geometrien auf die Größe ($L \times H \times B$) von $6 \times 3 \times 3$ m begrenzt. Die Seitenwände, die Decke und der Bodenbereich wurden mit Hilfe geeigneter Materialien geschwärzt. Die Projektionswand (3×3 m) bestand vollflächig aus einer diffus reflektierenden weißen Projektionsleinwand. Für die Auswahl einer geeigneten Oberfläche wurde an insgesamt sechs verschiedenen Oberflächen der gerichtete und diffuse Reflexionsgrad in der Ulbrichtschen Kugel nach DIN 5036, Teil 3 gemessen. Alle sechs Proben zeigen diffuse Reflexionsgrade um den Wert 0,9. (vgl. Anhang, Kapitel A5.1, Tabelle A5.1) Als Oberfläche der Leinwand wurde, aufgrund der höchsten Werte, die Oberfläche gemäß Probe 2 gewählt. Der Raum wurde vollständig abgedunkelt, so dass er dem Leuchtdichteniveau des nächtlichen Straßenverkehr entspricht.

Die Projektionsleinwand ist in Bild 5-1 in zwei Bereiche untergliedert. Im oberen Bereich L_1 ($2,80 \times 2,10$ m) wurden in beiden Untersuchungsabschnitten (UA I, UA II) die Szenarien mit Hilfe des Projektors B_1 abgebildet. Im unteren Bereich L_2 ($2,80 \times 0,50$ m) wurde im zweiten Untersuchungsabschnitt (UA II) die Tracking-Aufgabe mit Hilfe des Projektors B_2 abgebildet. Das System Projektor B_1 -Leinwand wurde im Vorfeld hinsichtlich der realitätsnahen Abbildung geprüft. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im folgenden Kapitel 5.2.2 zusammengefasst.

Der Proband bzw. dessen Augen befanden sich in einem Abstand von 5,50 m von der Projektionsleinwand entfernt, um Fernakkommodation zu gewährleisten. Die Höhe der Augen wurde mit Hilfe eines justierbaren Gesichtsrahmens auf 1,12 m eingestellt, vergleichbar mit der durchschnittlichen Augenhöhe in Fahrzeugen. Der Proband wurde mittig vor der Projektionsleinwand platziert.

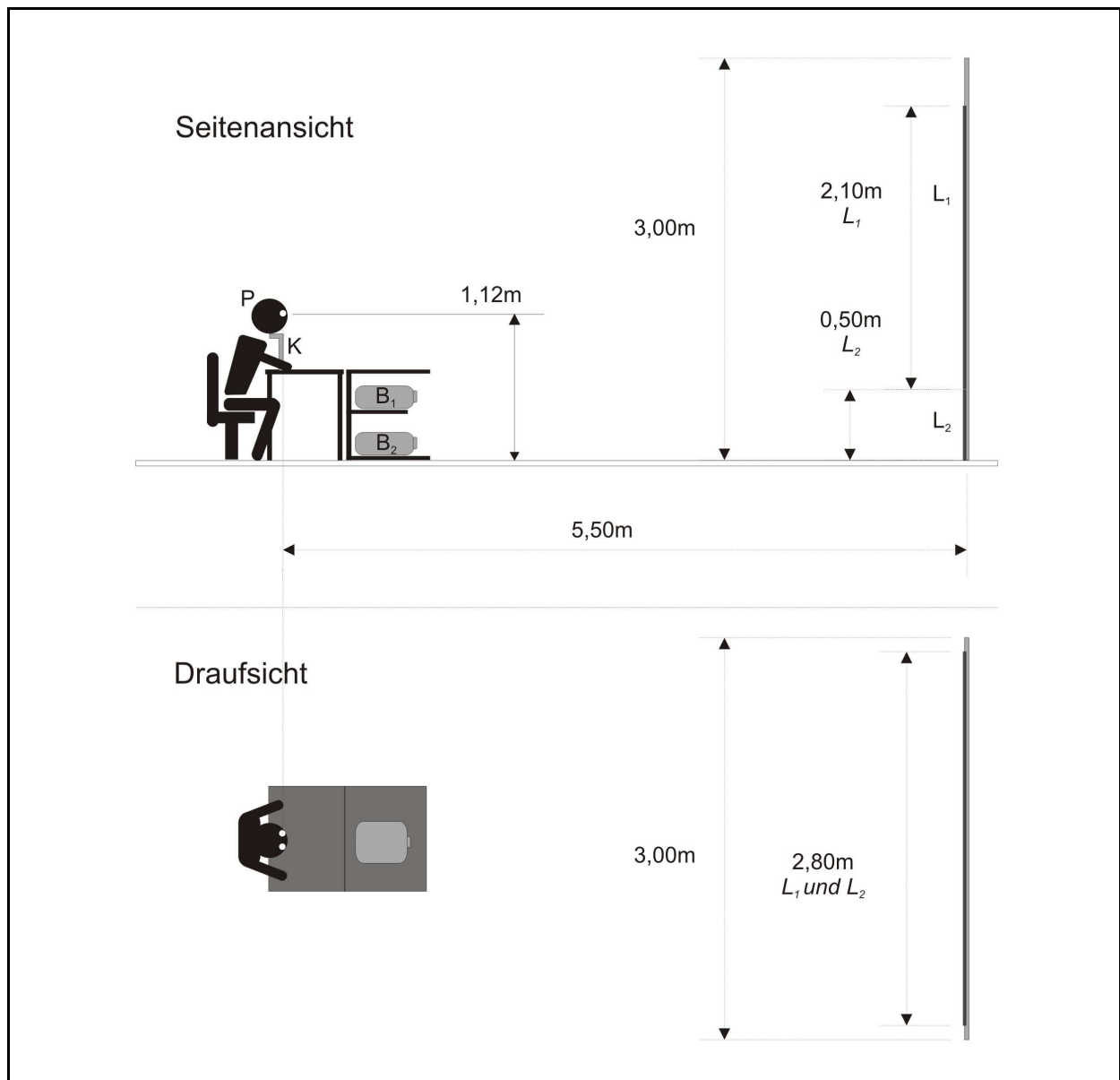


Bild 5-1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus im Labor

P	Proband
K	Justierbarer Gesichtsrahmen mit Kinnstütze
B1	Projektor für die Szenarien
B2	Projektor für die Tracking-Aufgabe (nur in UAI)
L1	Projektionsleinwandbereich für die Szenarien
L2	Projektionsleinwandbereich für die Tracking-Aufgabe (nur UAI)

Tabelle 5.2: Legende zu Bild 5-1

5.2.2 Lichttechnische Überprüfung

Im Labor wurden die im Straßenraum aufgenommenen Szenarien über den Projektor B1 auf die Leinwand projiziert. Anhand lichttechnischer Untersuchungen wurde geprüft, in wie weit die Präsentationen im Labor mit den Verhältnissen in der

Realität übereinstimmen und ob die Objekte im Labor wahrgenommen werden können.

Dazu wurde das im Bild 5-2 dargestellte Szenario auf dem Griesheimer Flugplatz aufgebaut. Die Verkehrszeichen befanden sich jeweils im Abstand von 50 m, 75 m und 100 m vom Scheinwerfer des Fahrzeugs entfernt. Sie wurden, entsprechend den vorgeschriebenen Werten, im horizontalen Abstand von 1,50 m (gemessen vom Fahrbahnrand) und im vertikalen Abstand von 2,0 m (über Oberkante Fahrbahn) angebracht. (vgl. HAV (2002))

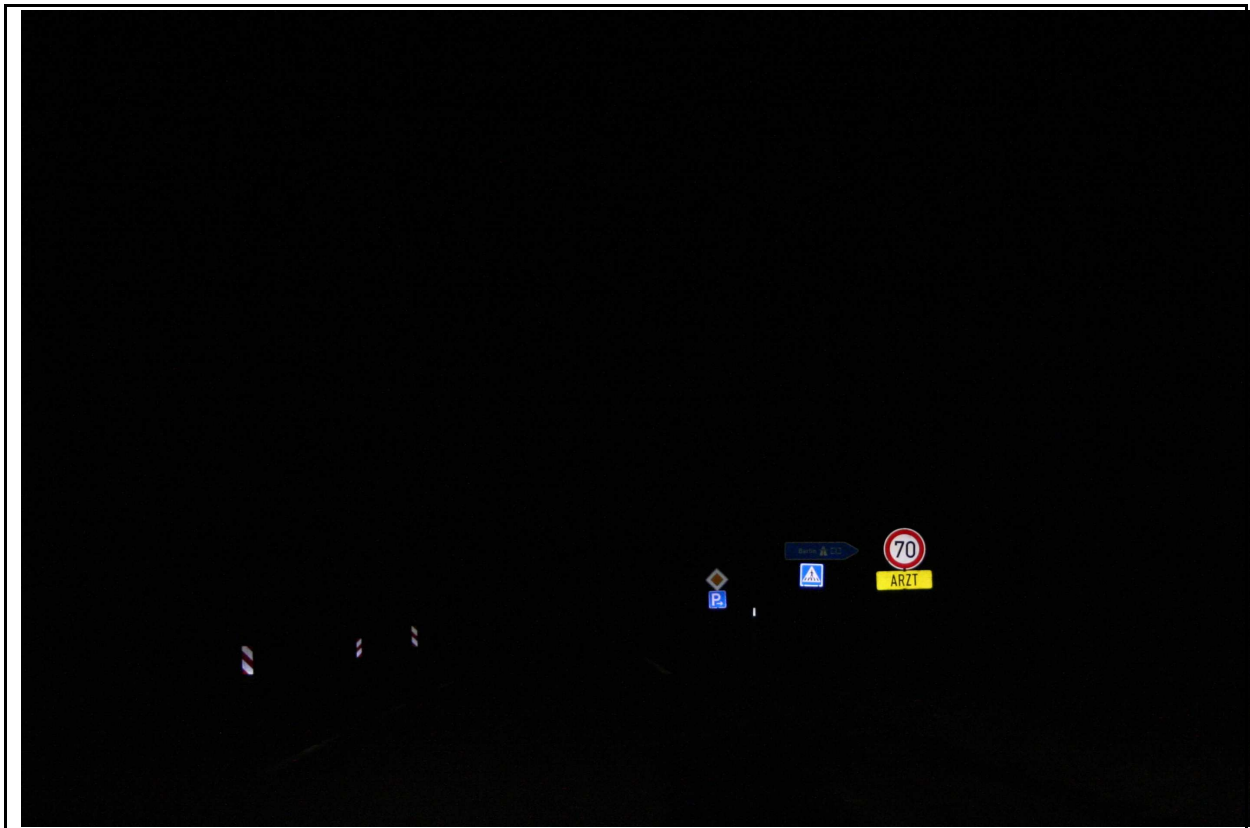


Bild 5-2: Gestelltes Szenario auf dem Griesheimer Flugplatz

Die Untersuchungen erfolgten mit drei verschiedenen Fahrzeugen, einem Golf V mit Halogenscheinwerfern (H7), einem Audi A5 mit Xenonscheinwerfern (A5 XE) und einem Audi A6, ebenfalls mit Xenonscheinwerfern (A6 XE). Unter fahrzeugeigener Beleuchtung wurde das Szenario aus der Fahrerperspektive einerseits mit einer Leuchtdichtekamera, andererseits mit einer Digitalkamera aufgenommen. Das digitale Bild wurde im Labor über den Projektor B₁ an die Leinwand projiziert, dieses Bild wurde ebenfalls mit einer Leuchtdichtekamera aufgenommen. Beide Leuchtdichtebilder, das aus der Realität (Flugplatz) und das aus dem Labor, wurden ausgewertet und miteinander verglichen.

Im folgenden Bild 5-3 sind die Ergebnisse der Auswertung der Leuchtdichtebilder hinsichtlich der mittleren Leuchtdichten der Verkehrszeichen in der Realität und im Labor für den Golf V mit Halogenscheinwerfern (H7) dargestellt. Es ist erkennbar, dass die mittleren Leuchtdichten der Verkehrszeichen in der Realität überwiegend höher sind als im Labor. Für den Audi A5 und den Audi A6 konnten vergleichbare Ergebnisse ermittelt werden, diese sind im Anhang, Bild A5.1 und Bild A5.3 abgebildet.

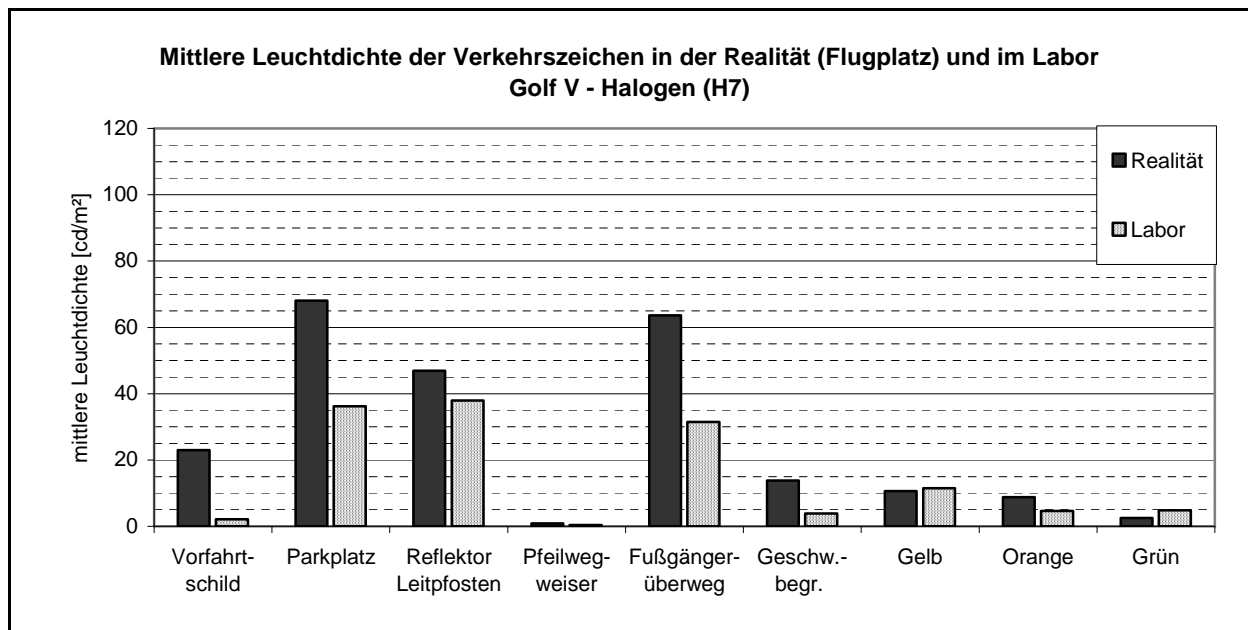


Bild 5-3: Gegenüberstellung der mittlere Leuchtdichten der Verkehrszeichen in der Realität und im Labor für den Golf V (H7)

Vergleichend dazu sind in Bild 5-4 die Ergebnisse der Auswertung hinsichtlich der mittleren Leuchtdichten der Umfeldler der Verkehrszeichen in der Realität und im Labor für den Golf V (H7) dargestellt. Es wird deutlich, dass die mittleren Leuchtdichten der Umfeldler im Labor höher sind als in der Realität. Die Unterschiede bewegen sich zwischen dem Faktor 4 und dem Faktor 10. Für den Audi A5 und den Audi A6 konnten vergleichbare Ergebnisse ermittelt werden, diese sind im Anhang, Bild A5.2 und Bild A5.4 abgebildet.

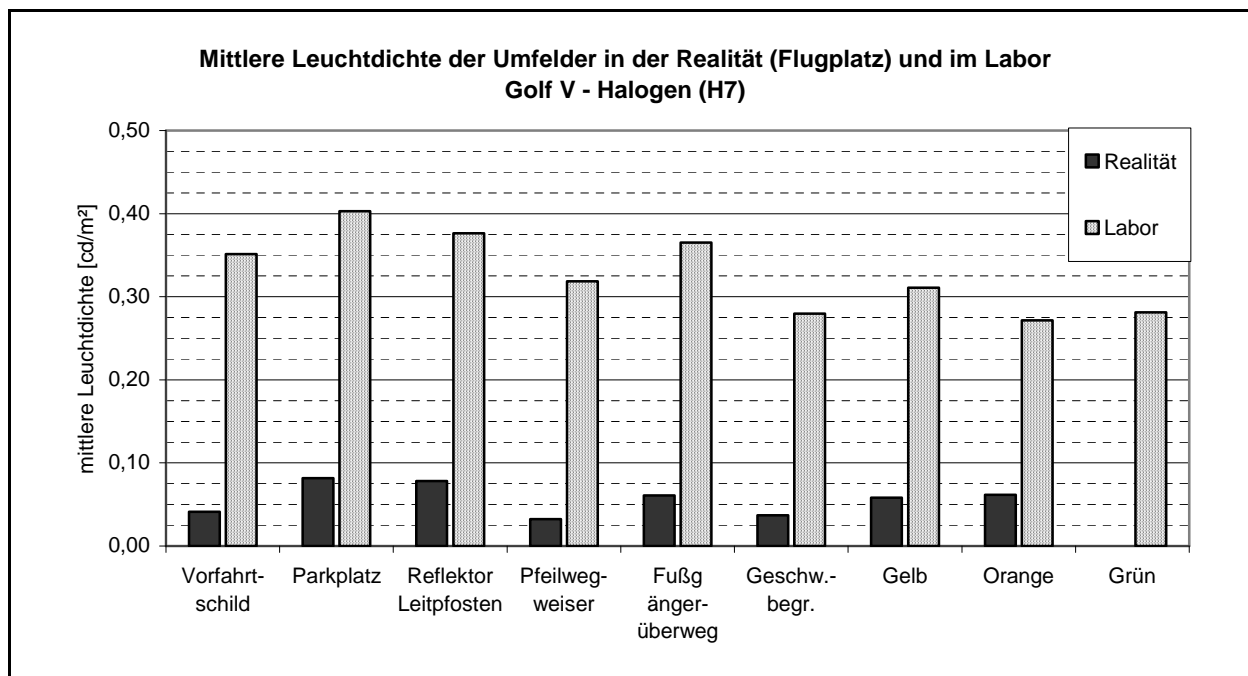


Bild 5-4: Gegenüberstellung der mittlere Leuchtdichten der Umfeldler der Verkehrszeichen in der Realität und im Labor für den Golf V (H7)

Die aus den mittleren Leuchtdichten berechneten Kontraste sind in Bild 5-5 vergleichend dargestellt. Hierbei ist erkennbar, dass die Kontraste in der Realität

höher liegen als im Labor. Die Unterschiede bewegen sich zwischen dem Faktor 5 und dem Faktor 100. Vergleichbare Ergebnisse ergeben sich auch hinsichtlich der Kontraste für den Audi A5 und den Audi A6, sie sind im Anhang, Bild A5.5 und Bild A5.6 dargestellt.

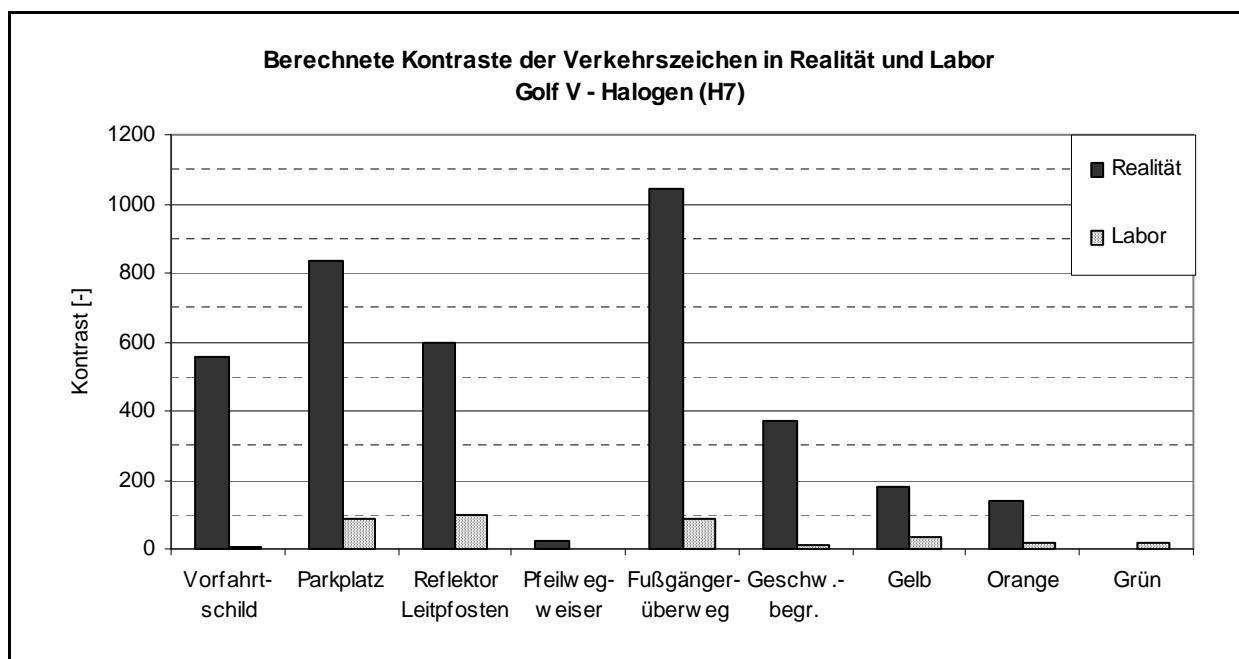


Bild 5-5: Gegenüberstellung der Kontraste in der Realität und im Labor für den Golf V (H7)

Zusammenfassend wird deutlich, dass im Vergleich zur Realität in den projizierten Szenarien im Labor hellere Objekte dunkler abgezeichnet werden und dunklere Objekte heller. Aufgrund der sehr geringen Kontraste im Labor, die zum Teil unterhalb dem Wert 4 liegen, stellt sich nun die Frage, ob diese Objekte im Labor tatsächlich wahrgenommen werden können. Diese Frage wird anhand der folgenden Bedingung geprüft: Um ein Objekt wahrnehmen zu können, muss der Leuchtdichteunterschied (ΔL) größer als der Schwellenleuchtdichteunterschied (ΔL_S) sein. Dabei gilt, je größer ein Objekt, desto geringer ist der Schwellenleuchtdichteunterschied. Die mathematischen Zusammenhänge für beide lichttechnischen Größen sind in Formel 5-1 und Formel 5-2 beschrieben. [ECKERT, 1993]

$$\Delta L = L_O - L_U$$

Formel 5-1

mit: L_O Objektleuchtdichte
 L_U Umfeldleuchtdichte

$$\Delta L_S = K \cdot (A/\alpha + B)^2$$

(ADRIAN (1969) in [ECKERT, 1993])

Formel 5-2

mit: $K = 3,1$ für nahezu 100%ige Wahrnehmungswahrscheinlichkeit

A, B Konstanten in Abhängigkeit von L_U

α Sehwinkel des Objektes

Für den Nachweis der Wahrnehmbarkeit der Objekte im Labor wurde für jedes Verkehrszeichen und sein Umfeld ΔL und ΔL_s berechnet. In Tabelle 5.3 sind für den Golf V (H7) die Werte für die beiden lichttechnischen Größen sowie die Ergebnisse des Nachweises angegeben. Für alle Verkehrszeichen ergibt sich: $\Delta L > \Delta L_s$. Demnach konnte nachgewiesen werden, dass alle Verkehrszeichen wahrgenommen werden konnten. Vergleichbare Ergebnisse wurden auch für den Audi A5 und den Audi A6 ermittelt. Sie sind im Anhang, Tabelle A5.2 und Tabelle A5.3 zusammengefasst.

Verkehrszeichen	α [']	ΔL [cd/m ²]	ΔL_s [cd/m ²]	Nachweis $\Delta L > \Delta L_s$
Vorfahrtschild	51,7915	1,7435	0,0083	WAHR
Parkplatzschild	41,2510	35,7571	0,0101	WAHR
Reflektor Leitpfosten	5,9588	37,5336	0,0666	WAHR
Pfeilwegweiser	173,1160	0,0632	0,0055	WAHR
Fußgängerüberweg	53,6245	31,1347	0,0084	WAHR
Geschwindigkeitsbegrenzung	99,8957	3,5425	0,0057	WAHR
Gelbes Zusatzschild	130,5716	11,1492	0,0057	WAHR
Oranges Zusatzschild	130,5716	4,3556	0,0052	WAHR
Grünes Zusatzschild	130,5716	4,5318	0,0053	WAHR

Tabelle 5.3: Der Nachweis der Wahrnehmbarkeit der Verkehrszeichen für den Golf V (H7)

Ergänzend zum rechnerischen Nachweis wurde von jeweils einem Probanden jeder Altersgruppe (Kapitel 5.3) die Wahrnehmbarkeit der Verkehrszeichen im Labor überprüft. Dazu mussten die Probanden nach Adaptation an die Umfeldleuchtdichte die erkannten Verkehrszeichen im jeweiligen Szenario benennen. Dieser Versuch bestätigte die rechnerisch gewonnenen Daten.

Somit wurde der Nachweis erbracht, dass trotz veränderter Präsentation der Szenarien im Labor, alle Verkehrszeichen wahrgenommen werden konnten.

5.3 Das Probandenkollektiv

5.3.1 Allgemeines

Bereits in Kapitel 4.6.2 wurde beschrieben, dass sich aufgrund der demographischen Veränderungen in den kommenden Jahrzehnten die Altersverteilung in Deutschland verändern wird. Aufgrund der prognostizierten Zahlen ist zu erwarten, dass sich die Zahl der älteren aktiven Verkehrsteilnehmer weiter erhöht.

In Bild 5-6, linker Bildausschnitt, ist die Altersverteilung für das Jahr 2004 dargestellt. Der größte Anteil (42%) aller Führerscheininhaber gehört der Altersgruppe der 25- bis 40jährigen an. Etwa ein Drittel aller Autofahrer ist in der Altersgruppe der 40- bis 60jährigen vertreten. Gut ein Sechstel der Autofahrer befindet sich in der Altersgruppe der über 60jährigen und nur 7% aller Autofahrer sind zwischen 18 und

25 Jahre alt. Im rechten Bildausschnitt ist eine Vorhersage über die Altersverteilung der Führerscheininhaber für das Jahr 2050 abgebildet. Grundlage für diese Vorhersage ist zum Einen die Prognose der demographischen Entwicklung in Deutschland (vgl. Kapitel 4.6.2), zum Anderen wurde für jede Altersgruppe getrennt der prozentuale Anteil der Personen mit Führerschein aus dem Jahr 2004 betrachtet. Unter der Annahme der aktuellen Altersverteilung und der aktuellen Verteilung der Führerscheininhaber ergeben sich für das Jahr 2050 folgende Zahlen: In der Altersgruppe der 18- bis 25jährigen besitzen ca. 68% einen Führerschein, in der Altersgruppe der 25- bis 40jährigen ca. 89%, in der Altersgruppe der 40- bis 60jährigen ca. 84% und in der Altersgruppe der über 60jährigen ca. 57%. Der größte Anteil (37%) aller Führerscheininhaber wird der Altersgruppe der über 60jährigen angehören. Damit hat sich der Anteil im Vergleich zum Jahr 2004 mehr als verdoppelt. Die Zahl der Führerscheininhaber, die der Altersgruppe der 25- bis 40jährigen angehören, hat sich hingegen fast halbiert. Die Zahlen für die Altersgruppen der 18- bis 25jährigen und der 40- bis 60jährigen sind annähernd gleich geblieben. Allerdings ist zu bedenken, dass im Jahr 2050 der prozentuale Anteil der Führerscheininhaber in der Altersgruppe der über 60jährigen wahrscheinlich höher als 57% sein wird, denn das Auto hat heute einen größeren Stellenwert als in den 1940er, 1950er und 1960er Jahren. Demnach muss davon ausgegangen werden, dass sich die Zahl der älteren Verkehrsteilnehmer bis zum Jahr 2050 weit mehr als verdoppeln wird.

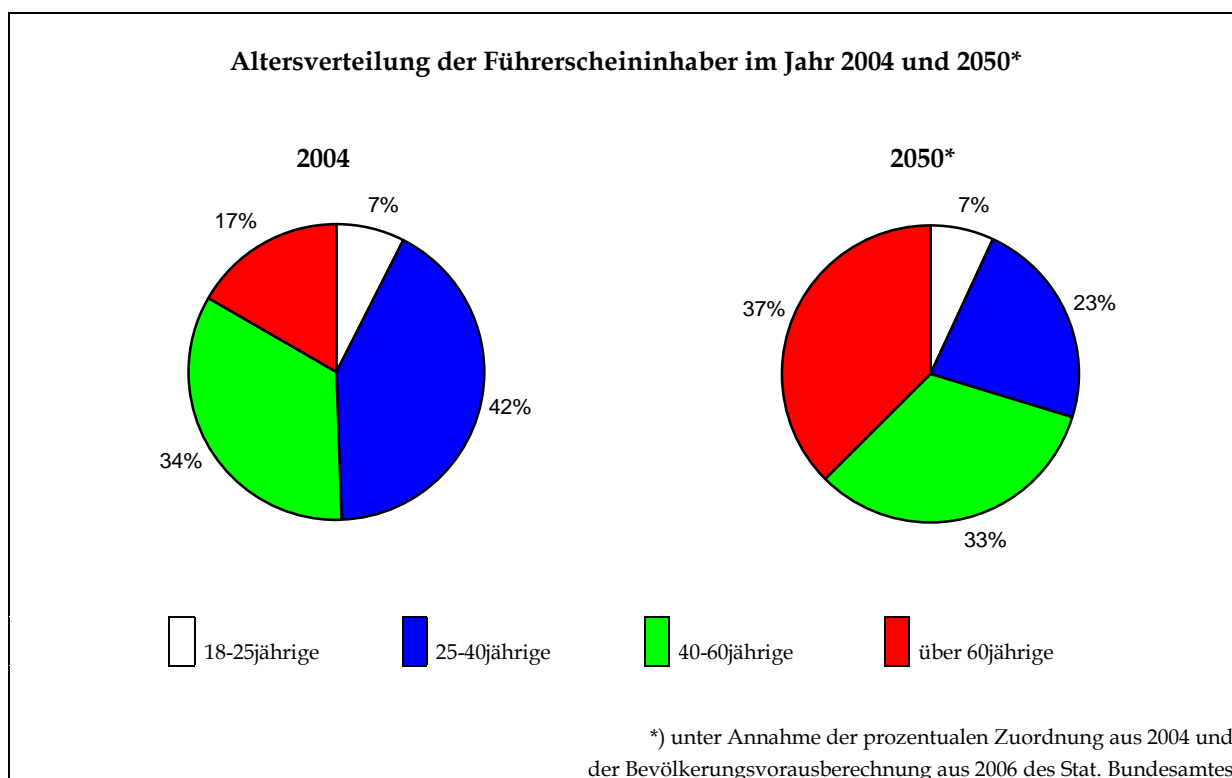


Bild 5-6: Altersverteilung der Führerscheininhaber für das Jahr 2004 und als Prognose für das Jahr 2050 [STATISTISCHES BUNDESAMT, 2006]

Weitere fahrerspezifische Einflussparameter, wie beispielsweise die Fahrerfahrung wurden im Rahmen dieser Untersuchungen nicht betrachtet. Aus diesem Grund wurden nur erfahrene Fahrer bei der Auswahl der Probanden berücksichtigt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass auch dieser Parameter auf das zu untersuchende

Thema einen erheblichen Einfluss ausübt. Daher wird angeregt, in künftigen Untersuchungen den Einfluss der Fahrerfahrung ausführlich zu prüfen, um die aus dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse erweitern zu können.

5.3.2 Die Altersverteilung der Probanden

Aufgrund des Wissens, dass der Alterungsprozess die Wahrnehmungsfähigkeit vermindert und sich die zentralen Prozesse der Informationsverarbeitung verlangsamen sowie aufgrund der im vorherigen Kapitel beschriebenen Entwicklungsprognose zur Altersstruktur der Bevölkerung, wurden im Rahmen dieser Arbeit die Probanden nach ihrem Alter unterteilt.

Für die folgenden Untersuchungen wurden die Probanden hinsichtlich ihres Alters in die bekannten Altersgruppen nach Bild 5-6 gegliedert. Im Rahmen dieser Arbeit wurden sieben Jahre Fahrpraxis als Kriterium für ausreichend Fahrerfahrung angenommen, welches von jedem Probanden vor den Versuchen in einem Fragebogen erhoben wurde. Da keine Fahranfänger teilnahmen, wurde die Altersgruppe der 18- bis 25jährigen ausgeschlossen. Die Altersgruppe der 25- bis 40jährigen wird im folgenden mit Altersgruppe jung bezeichnet, die Altersgruppe der 40- bis 60jährigen als Altersgruppe mittel und die der über 60jährigen als Altersgruppe alt.

An den psychophysischen Untersuchungen im Lichtlabor nahmen im Untersuchungsabschnitt I insgesamt 18 Probanden (zwölf männlich, sechs weiblich) teil, im Untersuchungsabschnitt II erweiterte sich dieses Kollektiv um fünf weitere Probanden, wobei diese nur an einem Untersuchungstag teilnahmen. Die Altersverteilung der Probanden für beide Untersuchungsabschnitte ist in Tabelle 5.4 dargestellt.

Untersuchungsabschnitt	Geschlecht	Alter			Summe
		jung 25 bis 40 Jahre	mittel 40 bis 60 Jahre	alt > 60 Jahre	
UAI	männlich	7	2	3	18
	weiblich	2	3	1	
UAII	männlich	7	5	5	23
	weiblich	2	3	1	

Tabelle 5.4: Altersverteilung der Probanden in den Untersuchungsabschnitten I und II

Außerdem wurden auch Blickverhaltensuntersuchungen im freien Feld und im Labor durchgeführt. In Tabelle 5.5 ist die Altersverteilung der Probanden für die Blickverhaltensuntersuchungen angegeben. Die Blickverhaltensuntersuchungen im freien Feld wurden von drei Probanden (ein weiblicher, zwei männliche) absolviert, die der Altersgruppe jung angehörten. Von diesen drei Probanden wurde das Blickverhalten zudem in beiden psychophysischen Untersuchungsabschnitten aufgezeichnet. Zusätzlich wurde das Blickverhalten im Untersuchungsabschnitt I von einem männlichen Probanden der Altersgruppe mittel sowie einem männlichen Probanden der Altersgruppe alt und im Untersuchungsabschnitt II von zwei

männlichen Probanden der Altersgruppe mittel sowie einem männlichen Probanden der Altersgruppe alt aufgenommen.

Untersuchungs- abschnitt	Alter			Summe
	25 bis 40 Jahre	40 bis 60 Jahre	> 60 Jahre	
Feld	3	-	-	3
UAI	3	1	1	5
UAI	3	2	1	6

Tabelle 5.5: Altersverteilung der Probanden für die Blickbeobachtungsuntersuchungen

5.3.3 Weitere fahrdemographische Daten

Neben dem Alter der Probanden wurden weitere fahrdemographische Daten mithilfe eines Fragebogens, der im Anhang, Bild A6.1 dargestellt ist, aufgenommen. Dazu zählen das Geschlecht, Jahre des Führerscheinbesitzes, gefahrene Kilometer innerhalb der letzten zwölf Monate, Anteil der Nachtfahrten innerhalb der letzten zwölf Monate, Sehfehler und ggf. seine Korrektur. Die Antworten aller Probanden sind im Anhang, Tabelle A6.1 und Tabelle A6.2 zusammengefasst.

Die Ergebnisse, die hinsichtlich der gefahrenen Kilometer der letzten zwölf Monate sowie dem Anteil an Nachtfahrten erfasst wurden, sind in Tabelle 5.6 zusammengefasst. Insgesamt neun der 24 Probanden berichteten, in den letzten zwölf Monaten, weniger als 10.000 km gefahren zu sein. Eine Kilometerleistung von 10.000 bis 20.000 km gaben sieben Probanden an und acht Probanden erklärten, mehr als 20.000 km gefahren zu sein. Hinsichtlich des Anteils an Nachtfahrten wird deutlich, dass fast die Hälfte aller Probanden einen eher geringen Anteil an Nachtfahrten absolvierten, wobei die größten Anteile in den Altersgruppen mittel und alt auftraten. Sieben Probanden gaben an, eher durchschnittlich viel (15 bis 25%) bei Nacht bzw. Dunkelheit zu fahren. Insgesamt sechs Probanden fuhren in den letzten zwölf Monaten mehr als ein Viertel der Strecke bei Nacht bzw. Dunkelheit, wobei die Mehrheit der Probanden der Altersgruppe jung zugeordnet werden konnte.

Altersstufe		25 bis 40 Jahre	40 bis 60 Jahre	> 60 Jahre	Summe
Kilometerleistung					
	< 10.000 km	3	1	1	5
	10.000 – 20.000 km	2	2	-	4
	> 20.000 km	4	2	3	9
Anteil an Nachtfahrten der letzten zwölf Monate					
	< 15%	2	3	1	6
	15 bis 25%	2	1	3	6
	> 25%	5	1	-	6

Tabelle 5.6: Übersicht über die Kilometerleistung der letzten zwölf Monate und dem Anteil der Nachtfahrten

Des Weiteren wurden die Probanden nach ihren Sehfehlern und deren Korrektur befragt. Unter Sehfehlern wurden im Rahmen dieser Untersuchungen genetische Störungen des Farbensehens (beispielsweise Mono- oder Dichromasie), Fehlsichtig-

keiten aufgrund von Brechungsfehlern auf der Netzhaut (beispielsweise Kurz- bzw. Weitsichtigkeit), verminderte Lichtdurchlässigkeit des Auges (beispielsweise Grauer Star), Störungen der Netzhautfunktion (beispielsweise Makuladegeneration) und Beeinträchtigungen des Sehnervs (beispielsweise Grüner Star) verstanden. Zwei Drittel aller Probanden gaben an, einen Sehfehler aufgrund von Brechungsfehlern auf der Netzhaut zu haben, der allerdings mithilfe von Brille oder Kontaktlinse korrigiert war. Kein Proband gab an, von anderen Sehfehlern betroffen zu sein.

5.4 Beschreibung der Untersuchungen

5.4.1 Psychophysische Untersuchungen - Untersuchungsabschnitt I

5.4.1.1 Allgemeines

Im Untersuchungsabschnitt I wurden den Probanden im Lichtlabor verschiedene Straßenraumszenarien, aufgenommen im realen Straßenraum, präsentiert. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, jedes gezeigte Straßenszenario entsprechend der subjektiv empfundenen Komplexität im Hinblick auf die Wahrnehmbarkeit von Verkehrszeichen einzustufen. Dazu wurde eine fünfstufige ordinalskalierte Skala nach dem Schulnotenprinzip vorgegeben. (vgl. Tabelle 5.7)

Die Komplexitätsstufe 1 beschreibt die Straßenszenarien, deren Umfeld als wenig komplex empfunden wird. Die vorliegende Situation wird als übersichtlich und leicht verständlich eingestuft. Die Wahrnehmung von relevanten Informationen wird nicht beeinflusst. Straßenszenarien der Komplexitätsstufe 3 werden als komplex eingestuft. Die Übersichtlichkeit der vorliegenden Situation ist aufgrund der Anzahl der visuellen Informationen geringfügig verändert. Die Wahrnehmung von relevanten Informationen wird nur in geringem Maß beeinflusst. Die Komplexitätsstufe 5 beschreibt Straßenszenarien, deren Umfeld als sehr komplex empfunden wird. Die vorliegende Situation wird als unübersichtlich und schwer verständlich eingestuft. Die Wahrnehmung von relevanten Informationen wird in hohem Maß beeinflusst.

Komplexitätsstufe	Beschreibung
1	Umfeld ist wenig komplex
2	Umfeld ist wenig komplex bis komplex
3	Umfeld ist komplex
4	Umfeld ist komplex bis sehr komplex
5	Umfeld ist sehr komplex

Tabelle 5.7: Fünfstufige Bewertungsskala zur Einstufung der Komplexität des Straßenszenarios

5.4.1.2 Inhalt der Untersuchungen

Alle der insgesamt 101 gezeigten Straßenszenarien wurden während Nachtfahrten auf deutschen Bundesautobahnen im realen Straßenraum aufgenommen. Nach Kapitel 5.1.2 konnten die Straßenszenarien hinsichtlich Anzahl, Größe und Anordnung der nicht-relevanten Objekte in vier verschiedene Kategorien (A, B, C, D) untergliedert werden. In Tabelle 5.8 ist die Verteilung der gezeigten Straßenszenarien in diesen Kategorien dargestellt.

Gruppen hinsichtlich der Merkmalsausprägungen	Anzahl der gezeigten Straßenszenarien
A	23
B	29
C	34
D	15

Tabelle 5.8: Übersicht über die Anzahl der gezeigten Straßenszenarien in Abhängigkeit der Anzahl nicht-relevanter Objekte

Jedes der 101 Straßenszenarien wurde von jedem Probanden insgesamt achtmal bewertet, ausgenommen Proband 3, der nur an einem Untersuchungstag teilnehmen konnte. Jeder Proband führte die Untersuchungen an zwei unterschiedlichen Tagen durch, wobei an jedem Untersuchungstag zwei Versuchsdurchgänge absolviert wurden. Jedes Szenario wurde pro Versuchsdurchgang insgesamt zweimal für jeweils drei Sekunden gezeigt.

5.4.1.3 Ablauf der Untersuchung UAI

In Tabelle 5.9 ist der Ablauf des Versuches dargestellt. Nach einer Einführung in die Problematik und dem Ausfüllen des Fragebogens wurde der justierbare Gesichtsrahmen mit Kinnstütze so eingestellt, dass die Augenhöhe des Probanden 1,12 m betrug. Bei den Probanden, deren Blickverhalten aufgezeichnet wurde, wurde zusätzlich das Blickbeobachtungssystem kalibriert. Danach erfolgte die ausführliche Erläuterung des Ablaufs der Untersuchung sowie der Aufgabe. (vgl. Tabelle 5.7) Nach einem kurzen Probelauf und Beantwortung eventueller Fragen begann die Adaptationszeit von insgesamt 20 Minuten. Nach dieser Zeit konnte davon ausgegangen werden, dass der Proband weitestgehend dunkeladaptiert ist. Anschließend wurde der erste Versuchsdurchgang durchgeführt, der insgesamt ca. zehn Minuten andauerte. Nach einer Erholungspause von zehn Minuten wurde der zweite Versuchsdurchgang gestartet, der ebenfalls ca. zehn Minuten andauerte.

Abschnitt	Zeitraum
Einführung und Fragebogen	10 min
Einstellungen, Erläuterungen und Probelauf	15 min ¹¹
Adaptationszeit	20 min
1. Versuchsdurchgang	10 min
Pause	10 min
2. Versuchsdurchgang	10 min
Summe	75 min

Tabelle 5.9: Zeitplan des Untersuchungsabschnittes I

¹¹ Bei Einsatz des Blickbeobachtungssystems verlängerte sich dieser Zeitraum um ca. 20 min, um das System zu kalibrieren.

5.4.2 Psychophysische Untersuchungen - Untersuchungsabschnitt II

5.4.2.1 Allgemeines

Im Untersuchungsabschnitt II wurde der Einfluss der Komplexität des Umfeldes auf die Wahrnehmung von Verkehrszeichen untersucht. Dazu wurden so genannte Signal-Entdeckungs-Versuche (Hauptaufgabe) mit paralleler Tracking-Aufgabe (Nebenaufgabe) durchgeführt. Um beide Aufgaben lösen zu können, mussten die Probanden ihre Aufmerksamkeit entsprechend der Aufgabenverteilung teilen, der Hauptaufgabe ist dabei der größere Anteil der Aufmerksamkeit zu widmen, der Nebenaufgabe ein geringerer. Nach LUFF (1988) kann anhand der Qualität der Ausübung der Nebenaufgabe auf die Beanspruchung der Hauptaufgabe geschlossen werden. Demnach wurde vermutet, je höher die Komplexität des Szenarios, desto mehr Aufmerksamkeit wird der Signal-Entdeckungsaufgabe geschenkt und umso ungenauer wird die Tracking-Aufgabe gelöst.

5.4.2.2 Inhalt der beiden Aufgaben

In der Hauptaufgabe mussten die Probanden in den präsentierten Szenarien Verkehrszeichen, in diesem Fall Geschwindigkeitsbegrenzungsschilder, benennen. Dabei war es besonders wichtig, das Verkehrszeichen als solches zu erkennen. Die richtige Angabe des Inhaltes wurde nicht bewertet, da auch aufgrund der teilweise verminderten Qualität der Zahlen eine genaue Benennung schwierig war. Es wurden insgesamt 42 Szenarien, die bereits im Untersuchungsabschnitt I eingestuft wurden, für diese Untersuchung gewählt. Innerhalb eines Untersuchungsdurchgangs wurden die 42 Szenarien insgesamt viermal präsentiert, zweimal mit Geschwindigkeitsbegrenzungsschilder und zweimal ohne. Dazu wurden die Szenarien im Vorfeld mit einem geeigneten Bildbearbeitungsprogramm entsprechend verändert, es wurden an regelkonformen Aufstellorten Geschwindigkeitsbegrenzungsschilder mit verschiedenen Inhalten (Angaben) eingefügt.

Die Nebenaufgabe, eine so genannten Tracking-Aufgabe, wurde mithilfe des Projektors B₂ im unteren Leinwandbereich L₂ präsentiert. (vgl. Kapitel 5.2.1) Die Aufgabe der Probanden bestand darin, mit einer PC-Maus einen blauen Balken zwischen zwei weiße Balken zu navigieren. (vgl. Bild 5-7) Die beiden weißen Balken hatten einen festen Abstand von ca. einer Fahrstreifenbreite. Sie bewegten sich parallel in einer gleichmäßigen Geschwindigkeit von links nach rechts über die Leinwand, wobei sich ihre Richtung an zufälligen Wendepunkten änderte. Damit wurde die Fahrzeugführung innerhalb des Fahrstreifens simuliert. Während des Untersuchungsdurchgangs wurde die Stellung des blauen Balkens zu den weißen Balken protokolliert, befand sich der blaue Balken innerhalb der zwei weißen Balken war die Aufgabe gelöst, befand sich der blaue Balken auf einem weißen Balken oder außerhalb der zwei weißen Balken, war die Aufgabe nicht gelöst.

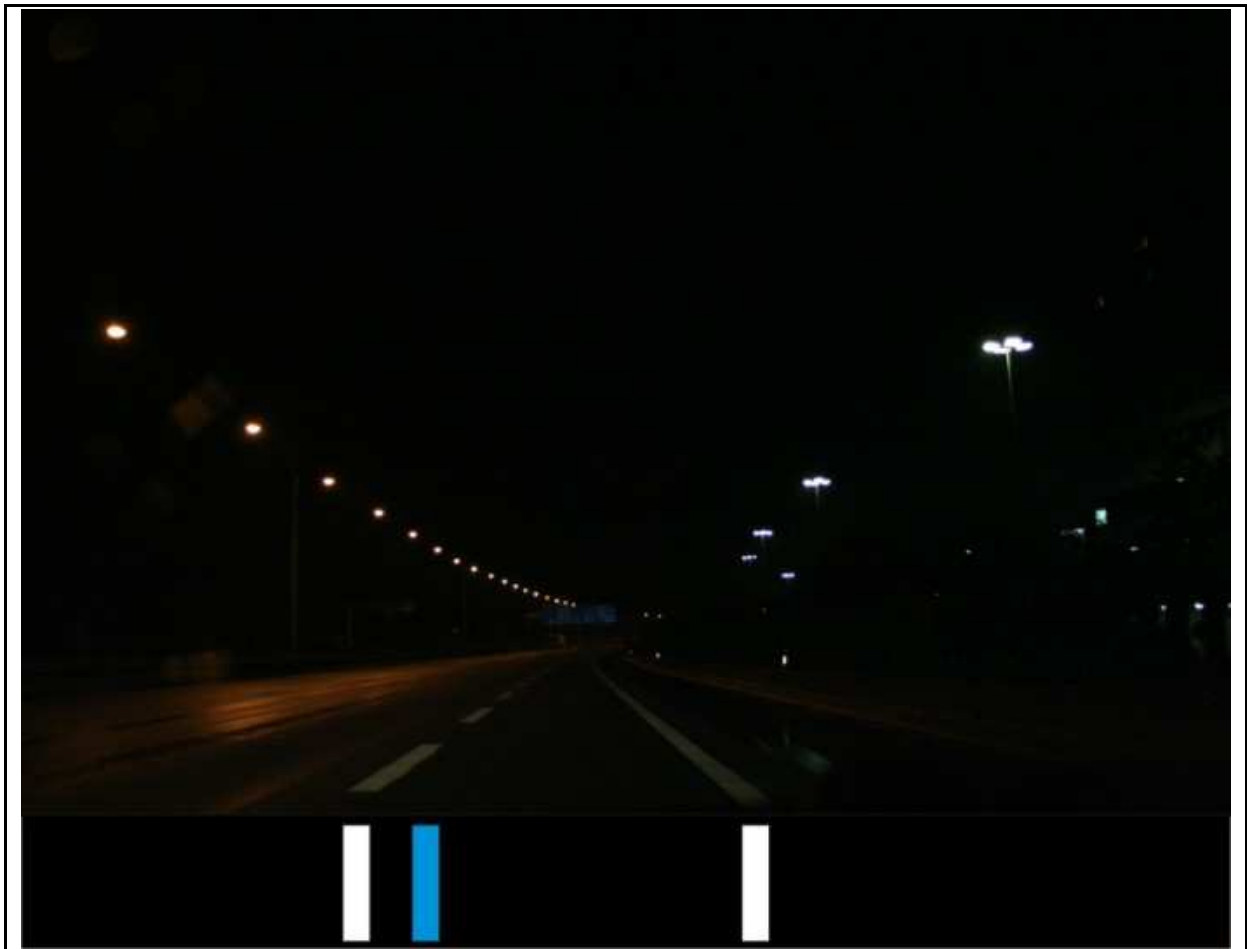


Bild 5-7: Präsentation der Hauptaufgabe (oben) und der Nebenaufgabe (unten) im Untersuchungsabschnitt II

5.4.2.3 Ablauf der Untersuchung UAll

In Tabelle 5.10 ist der Ablauf des Versuches dargestellt. Nach einer Einführung in die Problematik und dem Ausfüllen des Fragebogens (nur bei den zusätzlichen Probanden) wurde der justierbare Gesichtsrahmen mit Kinnstütze so eingestellt, dass die Augenhöhe des Probanden 1,12 m betrug. Bei den Probanden, deren Blickverhalten aufgezeichnet wurde, wurde zusätzlich das Blickbeobachtungssystem kalibriert. Danach der Untersuchungsablauf sowie die Aufgabe ausführlich erläutert. Nach der Adaptationszeit von insgesamt 20 Minuten wurde mit den Probanden zunächst die Tracking-Aufgabe geübt, um beispielsweise Veränderungen an der Konfiguration der PC-Maus vornehmen zu können. Danach wurden nochmals beide Aufgaben parallel geübt. Anschließend wurde der erste Versuchsdurchgang durchgeführt, der insgesamt ca. zehn Minuten andauerte. Nach einer Erholungspause von zehn Minuten wurde der zweite Versuchsdurchgang gestartet, der ebenfalls ca. zehn Minuten andauerte.

Abschnitt	Zeitraum
Einführung und ggf. Fragebogen	10 min
Einstellungen und Erläuterungen	10 min ¹²
Adaptationszeit	20 min
Übung der Tracking-Aufgabe und Probelauf	15 min
1. Versuchsdurchlauf	10 min
Pause	10 min
2. Versuchsdurchlauf	10 min
Summe	85 min

Tabelle 5.10: Zeitplan des Untersuchungsabschnittes II

5.4.3 Blickverhaltensuntersuchungen

5.4.3.1 Allgemeines

Die Blickverhaltensuntersuchungen wurden zum Einen im freien Feld und zum Anderen im Lichtlabor durchgeführt. Das Blickverhalten der Probanden wurde mithilfe eines Blickbeobachtungssystems, welches vom Institut für Arbeitswissenschaft der Technischen Universität Darmstadt zur Verfügung gestellt wurde, aufgezeichnet.

Dieses System, der Firma SMI SensoMotoric Instruments GmbH, ist über einen Fahrradhelm am Kopf des Probanden befestigt. (vgl. Bild 5-8) Über eine Videokamera wird das Auge (Pupille und Cornea-Reflex-Punkt) aufgezeichnet. Neben dem Helm mit seinen Komponenten gehört zu diesem System noch ein PC, der über die notwendige Software verfügt, um das System zu kalibrieren und zu betreiben. Der Versuchsleiter hat die Möglichkeit, während des Versuches die Blickbewegungen über einen Monitor zu verfolgen. Somit kann er eventuelle Fehlfunktionen schnell erkennen und den Versuch gegebenenfalls abbrechen und erneut starten.

Das System basiert auf dem Cornea-Reflex Prinzip. „Hierbei wird ausgenutzt, dass die Hornhaut des Auges (Cornea) glänzend ist und sich auftreffendes Licht einer punktförmigen Quelle spiegelt (erste Purkinje-Bild). Zur Bestimmung der Blickrichtung wird die Verschiebung des Cornea-Reflexes aufgrund der Position des Pupillenmittelpunktes und der relativ dazu liegenden Position des Cornea-Reflexes bestimmt.“ [IAD, 2008]

¹² Bei Einsatz des Blickbeobachtungssystems verlängert sich dieser Zeitraum um ca. 20 min, um das System zu kalibrieren.



Bild 5-8: Blickbeobachtungssystem im Einsatz

5.4.3.2 Aufnahmen im freien Feld

Die Versuchsfahrten zur Untersuchung des Blickverhaltens im freien Feld wurden von drei Mitarbeitern des Fachgebiets Straßenwesen, die als Probanden zur Altersgruppe jung gehörten, ausführt. Als Messfahrzeug diente ein Dienstwagen der Versuchsanstalt für Straßenwesen, mit dem die drei Probanden vertraut waren. Die Versuchsfahrten fanden jeweils an einem Wochentag bei Dunkelheit statt und starteten bzw. endeten an der TU-Lichtwiese. Die eigentliche Messstrecke führte über die folgenden Bundesautobahnabschnitte:

- BAB 5 von der Anschlussstelle Darmstadt in Fahrtrichtung Frankfurt bis zum Westkreuz Frankfurt,
- BAB 648 in Fahrtrichtung Stadtmitte Frankfurt bis zum Ende der Autobahn und zurück in Fahrtrichtung Wiesbaden bis zum Eschborner Dreieck,
- BAB 66 in Fahrtrichtung Wiesbaden bis zum Wiesbadener Kreuz,
- BAB 3 in Fahrtrichtung Frankfurt bis zum Frankfurter Kreuz,
- BAB 5 in Fahrtrichtung Darmstadt bis zur Anschlussstelle Darmstadt.

Vor Antritt der Fahrt wurde das Blickbeobachtungssystem zunächst am Probanden fixiert und kalibriert. Die Fahrt dauerte insgesamt ca. 80 Minuten, wobei die Strecke zwischen der TU-Lichtwiese und der Anschlussstelle Darmstadt zum Einen dem Probanden als Gewöhnungsphase an das kopfgetragene System diente, zum Anderen konnte der Versuchsleiter in dieser Zeit die Funktionsweise des Systems prüfen. Die Probanden erhielten vor Fahrtantritt folgende Hinweise:

- Nutzen Sie, wenn möglich, die rechte Fahrspur!

- Fahren Sie nicht zu dicht auf LKW auf, sondern Überholen Sie gegebenenfalls!
- Halten Sie sich an die vorgegebenen Geschwindigkeitsbegrenzungen!
- Fahren Sie eine gleichmäßige Geschwindigkeit von 100 km/h!
- Die Navigationszielpunkte werden Ihnen während der Fahrt mitgeteilt!

Während der Fahrt wurden die Probanden rechtzeitig über das nächste anzufahrende Ziel informiert, beispielsweise *Fahren Sie am Westkreuz Frankfurt auf die A648 in Richtung Stadtmitte!*. Somit konnte gewährleistet werden, dass die Probanden die Verkehrsschilder fixieren, um relevante Informationen zu erhalten.

5.4.3.3 Aufnahmen im Versuchslabor

Das Blickverhalten im Versuchslabor wurde von fünf Probanden während dem Untersuchungsabschnitt I und von sechs Probanden während dem Untersuchungsabschnitt II aufgezeichnet. (vgl. Tabelle 5.5)

5.5 Auswertung des Untersuchungsabschnitts I

5.5.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des Untersuchungsabschnitts I dargestellt. Die ermittelten Daten werden hinsichtlich verschiedener Einflussparameter statistisch ausgewertet und auf Grundlage der psychologischen und physiologischen Kenntnisse bewertet.

Die statistische Datenanalyse erfolgt mithilfe des Computerprogramms SPSS 13.0 für Windows (Superior Performance Software Systems)¹³. Die Ergebnisse der verschiedenen Analysen werden im Folgenden auf Grundlage der Ergebnisse von SPSS 13.0 für Windows dargestellt und interpretiert.

Von jedem Probanden liegen für jedes der 101 Szenarien insgesamt acht Bewertungen der subjektiv empfundenen Komplexität vor (Ausnahme Proband 3, nur vier Bewertungen). Für die folgenden statistischen Auswertungen der subjektiv empfundenen Komplexität wird jeder Proband über seinen individuellen Median (zentrale Tendenz) charakterisiert. Außerdem basieren die folgenden statistischen Analysen auf der Annahme, dass die individuellen Mediane der einzelnen Probanden ordinalskaliert vorliegen. Da es sich hierbei um psychophysische Untersuchungen handelt und die Zahl der einwirkenden Variablen (beispielsweise Motivation) nicht vollständig erfasst werden konnte, wird als Signifikanzgrenze für alle statistischen Tests die Irrtumswahrscheinlichkeit von $p \leq 0,05$ festgelegt.

Im Folgenden werden die Zusammenhänge zwischen den Parametern Alter bzw. Altersgruppe sowie Kategorie der Szenarien und der subjektiv empfundenen Komplexität¹⁴ analysiert. Zwischen den Parametern Geschlecht, Fahrleistung innerhalb der letzten 12 Monate bzw. Anteil der Nachtfahrten und der subjektiv

¹³ Eine empfehlenswerte Einführung in das Programm SPSS liefern JANSSEN und LAATZ (2007)

¹⁴ Für die folgenden Auswertungen wird der Begriff „subjektiv empfundene Komplexität“ aufgrund der Einfachheit teilweise mit dem Begriff „Komplexität“ bezeichnet. Beide Begriffe beschreiben die Komplexität, die subjektiv empfunden wird.

empfundenen Komplexität konnte anhand statistischer Auswertungen kein Zusammenhang ermittelt werden. Die ausführliche Analysen dieser Parameter sowie des Parameters Wiederholung sind im Anhang, Kapitel A7 zusammengefasst.

5.5.2 Der Einfluss des tatsächlichen Alters bzw. der Altersgruppe

5.5.2.1 Allgemeines

Der Einfluss des Alters auf die Komplexität wird zum Einen bezogen auf das *tatsächliche Alter des Probanden* und zum Anderen bezogen auf die *Altersgruppe* untersucht. Im Rahmen der Untersuchung wurden die Probanden hinsichtlich ihres Alters in drei Altersgruppen untergliedert. (vgl. Kapitel 5.3.2) Zunächst wird der Einfluss des Alters des Probanden untersucht, danach erfolgt die statistische Analyse bezogen auf die Altersgruppen.

5.5.2.2 Statistische Analyse des Parameters *tatsächliches Alter des Probanden*

Das tatsächliche Alter der Probanden (Altersstufe) liegt zwischen 27 und 69 Jahren. Aufgrund der geringen Anzahl an Probanden, ist für jedes tatsächliche Alter meist nur ein Stichprobenumfang von einem Wert (ein Proband) vorhanden. Ausnahmen sind die Altersstufen 28 Jahre mit drei Probanden und 48 Jahre mit zwei Probanden. Auf eine umfassende statistische Auswertung des tatsächlichen Alters muss daher verzichtet werden.

In Bild 5-9 sind die Mediane sowie die Minima und Maxima aller Altersstufen dargestellt. Anhand der Lage der Mediane über die Altersstufen ist erkennbar, dass insbesondere die Probanden über 60 Jahre die Szenarien komplexer einstufen als beispielsweise die Probanden zwischen 27 und 32 Jahre. Um den Einfluss des tatsächlichen Alters ermitteln zu können, also statistisch abgesicherte Ergebnisse zu erhalten, müssen weitere Untersuchungen mit einer weitaus höheren Anzahl an Probanden für jede Altersstufe durchgeführt werden.

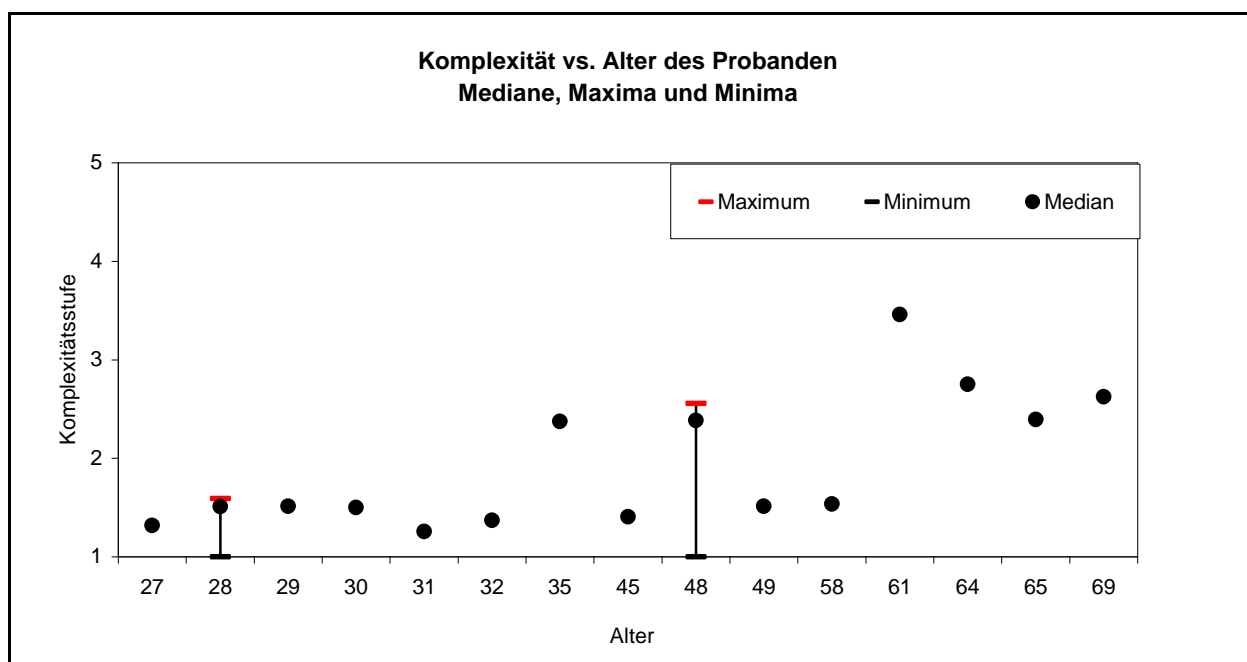


Bild 5-9: Median, Minimum und Maximum aller Altersstufen

5.5.2.3 Statistische Analyse des Parameters Altersgruppe

Im Folgenden wird der Einfluss des Alters auf die Komplexität in Abhängigkeit von der Altersgruppe (vgl. Kapitel 5.3.2) analysiert. Der Stichprobenumfang innerhalb jeder Altersgruppen ist für eine statistische Analyse ausreichend.

In Bild 5-10 sind die individuellen Mediane der Komplexität jedes Probanden aufgetragen. Das Diagramm ist in drei Bereiche unterteilt, welche die drei Altersgruppen widerspiegeln. Innerhalb der Altersgruppe jung ist erkennbar, dass die individuellen Mediane der Probanden in einem engen Band um den Komplexitätswert 1,5 liegen. Eine Ausnahme bildet Proband 2, dessen individueller Median befindet sich bei 2,37. Ähnliche Ergebnisse sind für die Altersgruppe mittel zu verzeichnen, wobei hier bereits der Anteil, der die Komplexität höher bewertenden Probanden - bezogen auf den Stichprobenumfang - größer ist. Die älteren Probanden (rechter Diagrammbereich) tendieren hingegen zu einer höheren Bewertung der Komplexität, ihre individuellen Mediane liegen in einem Bereich zwischen 2,40 und 3,46.

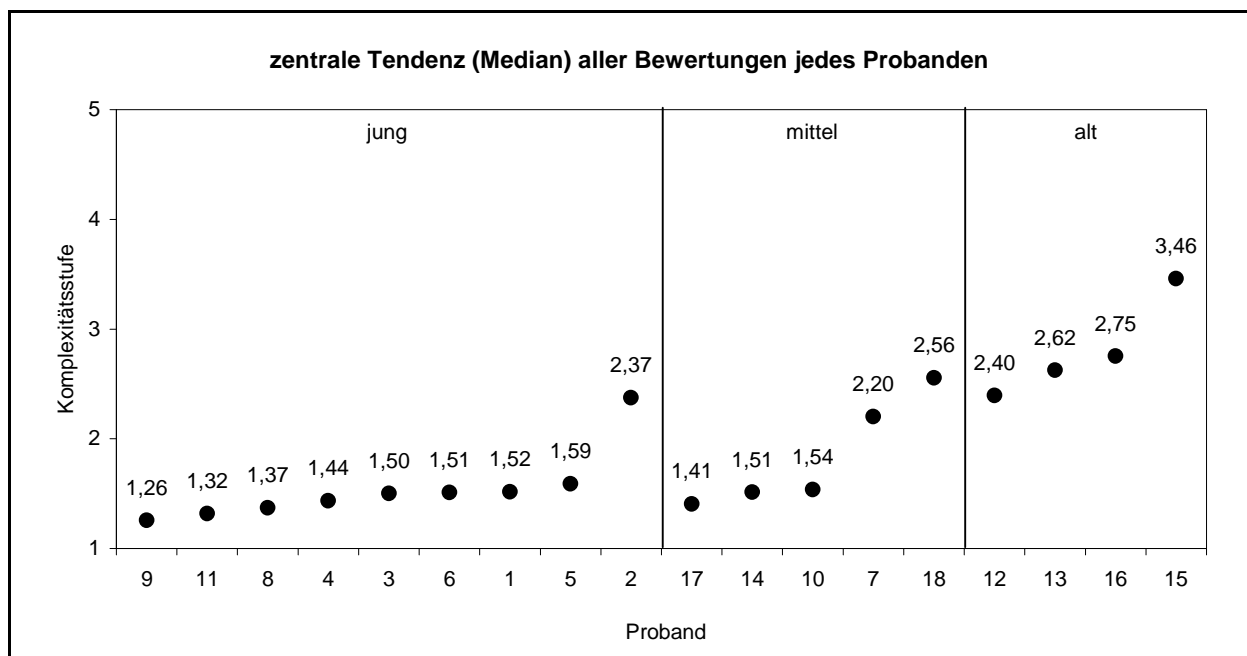


Bild 5-10: Individuelle Mediane der subjektiv empfundene Komplexität für jeden Probanden – gruppiert nach Altersgruppe

Aus den individuellen Medianen der einzelnen Probanden einer Altersgruppe lässt sich die zentrale Tendenz (Median) dieser Altersgruppe bestimmen. In Bild 5-11 sind die Mediane der subjektiv empfundenen Komplexität sowie die Maxima und Minima für jede Altersgruppe dargestellt.

Die Lage der Mediane lässt vermuten, dass die älteren Probanden die Szenarien komplexer bewerten als die Probanden der Altersgruppen jung und mittel. Zwischen den Medianen der Altersgruppen jung und mittel ist nur eine sehr geringe Differenz zu verzeichnen. Demnach lassen sich die folgenden zwei Hypothesen formulieren, die Nullhypothese (H0) und die Alternativhypothese (H1).

- H0:** Die drei Altersgruppen haben hinsichtlich der subjektiv empfundenen Komplexität die gleiche zentrale Tendenz.
- H1:** Die drei Altersgruppen haben hinsichtlich der subjektiv empfundenen Komplexität nicht die gleiche zentrale Tendenz; sie unterscheiden sich signifikant.

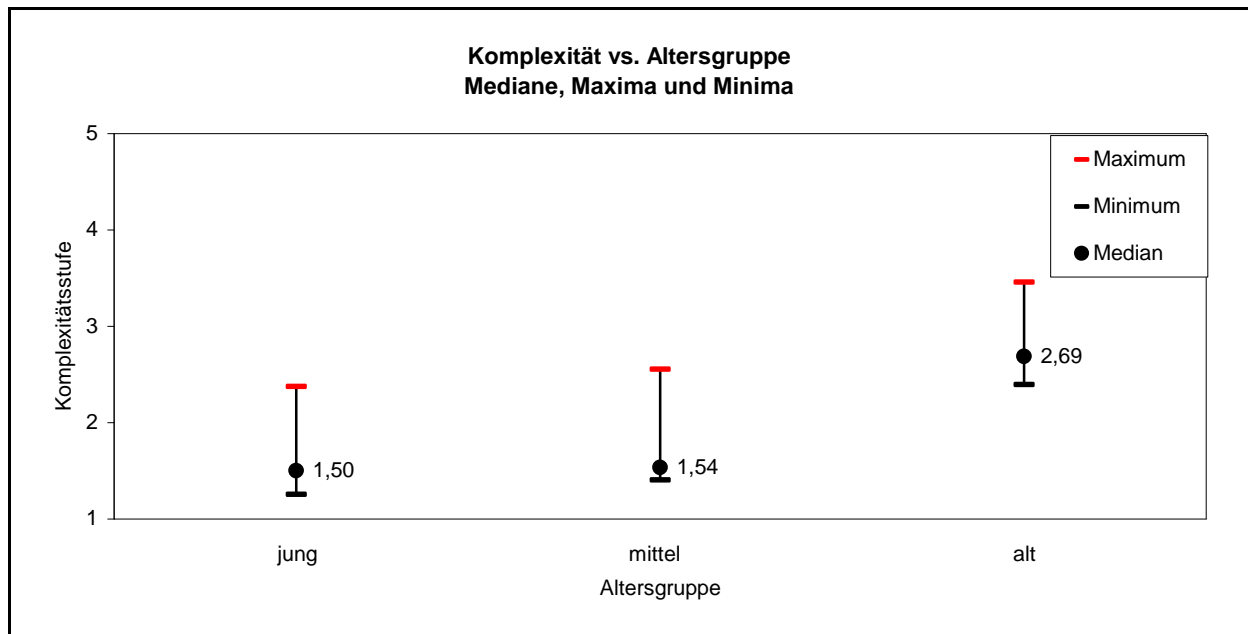


Bild 5-11: Mediane, Minima und Maxima der drei Altersgruppen

Zunächst wird anhand des Tests auf signifikante Unterschiede geprüft, ob sich die drei Stichproben hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz (Median) signifikant voneinander unterscheiden. Da die dabei untersuchten Variablen (Altersgruppe, Komplexitätsbewertung) Ordinalniveau aufweisen, die Anzahl der Stichproben größer ist als zwei und diese unabhängig voneinander sind, wird der H-Test nach Kruskal und Wallis herangezogen. Die Prüfgröße für diesen Test ist Chi-Quadrat. Das berechnete Chi-Quadrat wird mit dem kritischen Chi-Quadrat aus der Prüftabelle für das festgelegte Signifikanzniveau verglichen. Ist das berechnete Chi-Quadrat größer als das kritische Chi-Quadrat, liegt Signifikanz auf dem entsprechenden Niveau vor. Die Nullhypothese kann dann zugunsten der Alternativhypothese verworfen werden. ([BORTZ, 1985], [ZÖFEL, 2002])

In Tabelle 5.11 ist das Ergebnis dieses Signifikanztests dargestellt. Für die berechnete Prüfgröße Chi-Quadrat konnte ein Wert von 9,577 ermittelt werden. Der Wert des kritischen Chi-Quadrat für zwei Freiheitsgrade (df) auf dem Signifikanzniveau $p \leq 0,05$ beträgt 5,991. Der ermittelte Wert übersteigt den kritischen Tabellenwert. Demnach ist die Nullhypothese zugunsten der Alternativhypothese zu verwerfen und die drei Stichproben unterscheiden sich hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz signifikant voneinander.

Signifikanztest: H-Test nach Kruskal und Wallis	
Chi-Quadrat _(berechnet)	9,577
Chi-Quadrat _(kritischer Tabellenwert) (für $p \leq 0,05$, $df = 2$)	5,991
Bedingung: Chi-Quadrat _(berechnet) > Chi-Quadrat _(kritischer Tabellenwert)	erfüllt
Die Nullhypothese ist zugunsten der Alternativhypothese zu verwerfen.	

Tabelle 5.11: Ergebnis des Signifikanztests der Gleichheit der Mediane je Altersgruppe

Mithilfe eines paarweisen Vergleichs wird zusätzlich geprüft, welche der drei Stichproben sich im Einzelnen signifikant voneinander unterscheiden. Dieser Vergleich erfolgt aufgrund des Ordinalniveaus der Variablen anhand des U-Tests von Mann und Whitney. Die Prüfgröße für diesen Test ist der U-Wert. Der berechnete U-Wert wird mit dem kritischen U-Wert aus der Prüftabelle für das festgelegte Signifikanzniveau verglichen. Ist der berechnete U-Wert kleiner oder gleich dem kritischen U-Wert, so liegt Signifikanz auf dem entsprechenden Niveau vor und die beiden Stichproben unterscheiden sich signifikant voneinander. ([BORTZ, 1985], [ZÖFEL, 2002])

Die berechneten U-Werte, die kritischen U-Werte auf dem Signifikanzniveau $p \leq 0,05$ und die Ergebnisse des Signifikanztests der drei paarweisen Vergleiche sind in Tabelle 5.12 zusammengestellt. Der ermittelte U-Wert des paarweisen Vergleichs zwischen jung und mittel übersteigt den kritischen U-Wert auf dem Signifikanzniveau $p \leq 0,05$. Demnach unterscheiden sich die beiden Stichproben hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz nicht signifikant voneinander, der Unterschied wird als zufällig angenommen. Jedoch sind die ermittelten U-Werte der Vergleiche zwischen jung und alt sowie zwischen mittel und alt kleiner oder gleich den kritischen U-Werten auf dem Signifikanzniveau $p \leq 0,05$. Demnach unterscheiden sich beide Stichproben dieser beiden Vergleiche signifikant voneinander.

Signifikanztest: U-Test von Mann und Whitney			
paarweiser Vergleich	Prüfgröße U	U_{krit} (für $p \leq 0,05$)	Bedingung: $U \leq U_{krit}$
jung vs. mittel	12,00	7,00 (für $n_1 = 5$, $n_2 = 9$)	<u>nicht</u> erfüllt
jung vs. alt	0,00	4,00 (für $n_1 = 4$, $n_2 = 9$)	erfüllt
mittel vs. alt	1,00	1,00 (für $n_1 = 4$, $n_2 = 5$)	erfüllt

Tabelle 5.12: Ergebnisse der paarweisen Vergleiche zwischen den ermittelten Medianen je Altersgruppe

5.5.2.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Lage der Mediane bezogen auf das tatsächliche Alter lässt vermuten, dass insbesondere die Probanden über 60 Jahre die Szenarien subjektiv komplexer empfinden als die Probanden jünger als 60 Jahre. Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs in jeder Altersstufe können keine statistischen Analysen zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen tatsächlichem Alter und Bewertung der subjektiv empfundenen Komplexität durchgeführt werden. Um diesen Zusammenhang statistisch analysieren zu können, wird vorgeschlagen, eine

umfangreichere Studie mit einer weitaus höheren Anzahl an Probanden innerhalb der Altersstufen durchzuführen.

Um dennoch den Einfluss des Alters untersuchen zu können, werden die Altersgruppen (vgl. Kapitel 5.3.2) betrachtet. Dabei sind Stichprobenumfänge vorhanden, die für statistische Tests ausreichend sind. Die statistische Analyse hinsichtlich der Altersgruppen zeigt, dass sich die zentralen Tendenzen der Altersgruppen signifikant voneinander unterscheiden. Ein paarweiser Vergleich der Altersgruppen ergab, dass zwischen den Altersgruppen jung und mittel kein signifikanter Unterschied existiert. Zwischen den Altersgruppen jung und alt sowie mittel und alt ist jedoch ein signifikanter Unterschied vorhanden. Somit ist nachgewiesen, dass die Probanden der Altersgruppen jung und mittel hinsichtlich der subjektiv empfundenen Komplexität vergleichbare Bewertungen abgeben. Hingegen schätzen ältere Probanden die Szenarien komplexer ein. Aus der Differenz der Mediane wird deutlich, dass die älteren Probanden die Szenarien tendenziell um eine Komplexitätsstufe höher einstufen als die Probanden der Altersgruppen jung und mittel.

Dieses Ergebnis bestätigt zum Einen die bereits bekannte Tatsache, dass mit zunehmendem Alter die Leistungsfähigkeit des Gehirns nachlässt. Demnach wird es immer schwieriger alle Informationen wahrzunehmen und zu erkennen. Ältere Menschen (über 60 Jahre) können im Vergleich zu jüngeren Menschen (25 Jahre) nur 2/3 der Informationen aufnehmen und erreichen somit eher ihre Verarbeitungskapazität. Sie fühlen sich mit einer zu großen Anzahl an Informationen eher überfordert und stufen vermutlich daher die Komplexität des Szenarios höher ein. (vgl. Kapitel 4.6.2) Eine weitere Erklärung für diesen Zusammenhang stellt die Annahme dar, dass ältere Probanden sich während Fahrten bei Dunkelheit „unwohl“ fühlen. Dieses Unwohlsein kann beispielsweise in der verringerten Dämmerungssehschärfe, der höheren Blendempfindlichkeit oder der Einengung des Gesichtsfeldes begründet liegen, wodurch sich eine Fahrt bei Dunkelheit für den älteren Fahrer als sehr belastende Situation entwickeln kann. (vgl. Kapitel 4.3.1 und 4.6.2) Diese Annahme wird durch den von den älteren Probanden angegebenen Anteil der Nachtfahrten bekräftigt. Keiner der am Versuch teilgenommenen älteren Probanden fährt mehr als 25% der Fahrleistung bei Dunkelheit. Hingegen fahren mehr als die Hälfte der jüngeren Probanden mehr als 25% der Fahrleistung bei Dunkelheit. Welcher dieser beiden Erklärungen den größten Einfluss auf das Ergebnis nimmt, kann an dieser Stelle nicht geklärt werden. Es wird angeregt, diese Fragestellung beispielsweise in Form von Befragungen zu klären.

5.5.3 Der Einfluss der Kategorie der Szenarien

5.5.3.1 Allgemeines

Die 101 Szenarien lassen sich hinsichtlich ihrer Merkmale in vier verschiedene Kategorien (A, B, C und D) untergliedern. (vgl. Kapitel 5.1.2) Im Folgenden wird nun der Einfluss der Kategorie und damit auch der Einfluss der Anzahl der visuellen Objekte auf die subjektiv empfundene Komplexität untersucht. Zunächst wird dieser Zusammenhang bezogen auf das gesamte Probandenkollektiv geprüft, danach getrennt für jede Altersgruppe. Zum Schluss wird analysiert, ob die Unterschiede in der Bewertung der Komplexität zwischen den Altersgruppen auch innerhalb jeder einzelnen Kategorie signifikant ist.

5.5.3.2 Statistische Analyse des Parameters *Kategorie*

Die individuellen Mediane aller Probanden gruppiert nach der Kategorie der Szenarien sind im Anhang, Kapitel A7.5 zusammengefasst. Aus den individuellen Medianen der einzelnen Probanden einer Kategorie wurde die zentrale Tendenz (Mediane) für diese Kategorie bestimmt. In Bild 5-12 sind die Mediane sowie die Minima und Maxima der vier Kategorien dargestellt.

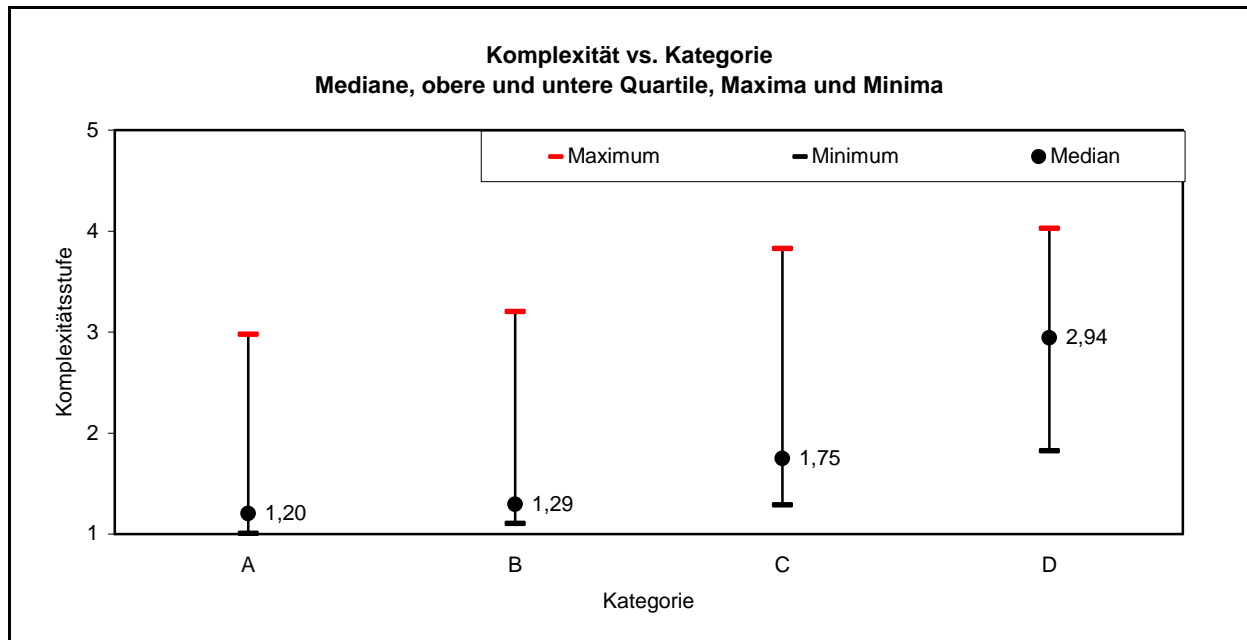


Bild 5-12: Median, Minimum und Maximum für die drei Ausprägungen des Anteil der Nachtfahrten innerhalb der letzten 12 Monaten

Beim Vergleich der vier Kategorien hinsichtlich der Lage der Mediane wird deutlich, dass die Differenz der Mediane zwischen den Kategorien A und B sehr gering ist. Die Differenz der Mediane zwischen den Kategorien A und C hingegen beträgt etwa eine halbe Komplexitätsstufe. Mehr als 1,5 Komplexitätsstufen trennen hingegen die Mediane zwischen den Kategorien A und D. Der Zusammenhang zwischen Kategorie und subjektiv empfundener Komplexität ist erkennbar. Es lassen sich die folgenden zwei Hypothesen formulieren, die Nullhypothese (H0) und die Alternativhypothese (H1).

- H0:** Die vier Kategorien haben hinsichtlich der subjektiv empfundenen Komplexität die gleiche zentrale Tendenz.
- H1:** Die vier Kategorien haben hinsichtlich der subjektiv empfundenen Komplexität nicht die gleiche zentrale Tendenz; sie unterscheiden sich signifikant.

Anhand des Tests auf signifikante Unterschiede wird überprüft, ob sich die vier Mediane signifikant voneinander unterscheiden, und ob somit die Nullhypothese zugunsten der Alternativhypothese zu verwerfen ist. Die untersuchten Variablen (Kategorie, Komplexitätsbewertung) weisen Ordinalniveau auf, die Anzahl der Stichproben ist größer als zwei und diese sind unabhängig voneinander. Demnach wird der H-Test nach Kruskal und Wallis herangezogen. (vgl. Kapitel 5.5.2.3)

In Tabelle 5.13 ist das Ergebnis des Signifikanztests dargestellt. Für die Prüfgröße Chi-Quadrat konnte ein Wert von 32,459 ermittelt werden. Der kritische Chi-Quadrat-Wert für drei Freiheitsgrade (df) auf dem Signifikanzniveau $p \leq 0,05$ beträgt 7,815. Der ermittelte Chi-Quadrat-Wert übersteigt den kritischen Tabellenwert. Demnach unterscheiden sich die vier Stichproben hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz signifikant voneinander. Die Nullhypothese ist zugunsten der Alternativhypothese zu verwerfen.

Signifikanztest: H-Test nach Kruskal und Wallis	
Chi-Quadrat _(berechnet)	32,459
Chi-Quadrat _(kritischer Tabellenwert) (für $p \leq 0,05$, $df = 3$)	7,815
Bedingung: Chi-Quadrat _(berechnet) > Chi-Quadrat _(kritischer Tabellenwert)	erfüllt
Die Nullhypothese ist zugunsten der Alternativhypothese zu verwerfen.	

Tabelle 5.13: Ergebnis des Signifikanztests der Gleichheit der Mediane je Altersgruppe

Anhand eines paarweisen Vergleichs wird im Folgenden geprüft, welche der vier Stichproben sich im Einzelnen signifikant voneinander unterscheiden. Der Vergleich erfolgt aufgrund des Ordinalniveaus der Variablen anhand des U-Tests von Mann und Whitney. (vgl. Kapitel 5.5.2.3)

Die berechneten U-Werte, der kritische U-Wert auf dem Signifikanzniveau $p \leq 0,05$ und die Ergebnisse des Signifikanztests der paarweisen Vergleiche sind in Tabelle 5.14 zusammengefasst. Der Vergleich der berechneten mit den kritischen U-Werten ergibt, dass mit Ausnahme des ersten Vergleichs alle Vergleiche signifikante Unterschiede aufweisen. Demnach werden die Szenarien der Kategorien A und B hinsichtlich der Komplexität gleich bewerten. Die Szenarien der Kategorie C werden hingegen komplexer als die Szenarien der Kategorien A und B eingestuft und die Szenarien der Kategorie D deutlich komplexer als die Szenarien der Kategorien A, B und C.

Signifikanztest: U-Test von Mann und Whitney			
paarweiser Vergleich	Prüfgröße U	$U_{krit} (p \leq 0,05, n_1 = 18, n_2 = 18)$	Bedingung: $U \leq U_{krit}$
Kat. A vs. Kat. B	119,00	99,00	<u>nicht</u> erfüllt
Kat. A vs. Kat. C	66,00		erfüllt
Kat. A vs. Kat. D	16,00		erfüllt
Kat. B vs. Kat. C	89,00		erfüllt
Kat. B vs. Kat. D	27,00		erfüllt
Kat. C vs. Kat. D	66,00		erfüllt

Tabelle 5.14: Ergebnisse der paarweisen Vergleiche zwischen den Kategorien der Szenarien

5.5.3.3 Statistische Analyse des Parameters *Kategorie*, jede Altersgruppe

Auch unabhängig vom Alter wird der Einfluss des Parameters *Kategorie* analysiert. Dazu werden die Mediane der drei Altersgruppen getrennt voneinander betrachtet. Die individuellen Mediane der Probanden gruppiert nach Altersgruppe und Kategorie sind im Anhang, Kapitel A7.5 zusammengefasst. Aus den individuellen Medianen der Probanden einer Altersgruppe und einer Kategorie wird die zentrale Tendenz (Mediane) für diese Altersgruppe und für diese Kategorie ermittelt. Im folgenden Bild 5-13 sind die Mediane sowie die Minima und Maxima der vier Kategorien für jede Altersgruppe dargestellt.

Beim Vergleich der vier Kategorien hinsichtlich der Lage der Mediane wird deutlich, dass sich diese in allen drei Altersgruppen hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz unterscheiden. Für jede Altersgruppe ist erkennbar, dass die Kategorie A hinsichtlich der Komplexität am geringsten eingestuft wird und die Kategorie D am höchsten. In den Altersgruppen jung und mittel sind die Differenzen zwischen den Kategorien A und B geringer als beispielsweise zwischen den Kategorien B und C oder C und D. In der Altersgruppe alt hingegen sind die Differenzen zwischen den Kategorien A und B bzw. B und C vergleichbar. In allen drei Altersgruppen sind die Differenzen zwischen den Kategorien C und D am größten. Der Zusammenhang zwischen der Kategorie der Szenarien und der subjektiv empfundenen Komplexität ist erkennbar. Es lassen sich für jede Altersgruppe die folgenden zwei Hypothesen formulieren, die Nullhypothese (H_0) und die Alternativhypothese (H_1).

H_0 : Die vier Kategorien haben hinsichtlich der subjektiv empfundenen Komplexität die gleiche zentrale Tendenz.

H_1 : Die vier Kategorien haben hinsichtlich der subjektiv empfundenen Komplexität nicht die gleiche zentrale Tendenz; sie unterscheiden sich signifikant.

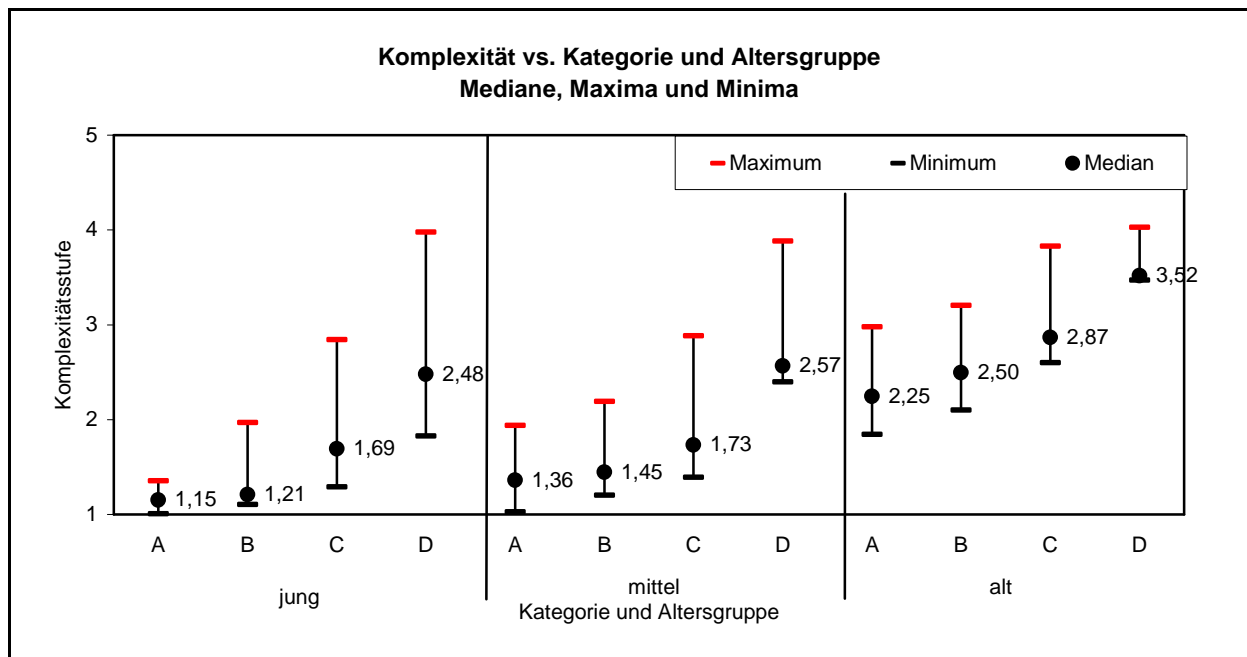


Bild 5-13: Median, Minimum und Maximum für die vier Kategorien getrennt nach den drei Altersgruppen

Ob die Nullhypothese zugunsten der Alternativhypothese verworfen werden kann, wird anhand des H-Tests nach Kruskal und Wallis geprüft. (vgl. Kapitel 5.5.2.3) Die ermittelten Werte für die Prüfgrößen Chi-Quadrat, der kritische Chi-Quadrat-Wert auf dem Signifikanzniveau $p \leq 0,05$ und die Ergebnisse des Signifikanztests sind in Tabelle 5.15 zusammengefasst. Die ermittelten Werte für alle Altersgruppen im Vergleich mit dem kritischen Tabellenwert zeigen, dass sich die vier Stichproben hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz signifikant voneinander unterscheiden. Für jede Altersgruppe ist die Nullhypothese zugunsten der Alternativhypothese zu verwerfen. Somit ist nachgewiesen, dass in jeder Altersgruppe ein Zusammenhang zwischen der Kategorie der Szenarien und der subjektiv empfundenen Komplexität existiert.

Signifikanztest: H-Test nach Kruskal und Wallis			
Altersgruppe	Prüfgröße Chi-Quadrat	Chi-Quadrat _{krit} ($p \leq 0,05$, $df = 3$)	Bedingung: Chi-Quadrat > Chi-Quadrat _{krit}
jung	26,596	7,815	erfüllt
mittel	10,623		erfüllt
alt	8,757		erfüllt

Tabelle 5.15: Ergebnisse der Signifikanztests der Gleichheit der Mediane je Kategorie für jede Altersgruppe

Anhand eines paarweisen Vergleichs innerhalb der Altersgruppen wird zusätzlich geprüft, welche der vier Stichproben sich im Einzelnen signifikant voneinander unterscheiden. Aufgrund des zu geringen Stichprobenumfangs innerhalb der Altersgruppen mittel (5 Probanden) und alt (4 Probanden) muss auf eine statistische Auswertung des paarweisen Vergleichs für diese Altersgruppen verzichtet werden.

Die Lage der Mediane in der Altersgruppe jung lässt vermuten, dass sich mit ansteigender Kategorie die subjektiv empfundene Komplexität erhöht.

Der Vergleich innerhalb der Altersgruppe jung erfolgt anhand des U-Tests nach Mann und Whitney. (vgl. Kapitel 5.5.2.3) Die berechneten U-Werte, die kritischen U-Werte auf dem Signifikanzniveau $p \leq 0,05$ und die Ergebnisse des Signifikanztests der paarweisen Vergleiche sind in Tabelle 5.16 zusammengefasst. Der Test zeigt, dass zwischen den Kategorien A und B kein signifikanter Unterschied besteht, die jungen Probanden bewerten die Komplexität der Szenarien der Kategorien A und B gleich. Allerdings weisen die folgenden Vergleiche nach, dass sich die Mediane hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz signifikant voneinander unterscheiden. Zudem wird deutlich, dass die Szenarien der Kategorie C signifikant komplexer eingestuft werden als die Szenarien der Kategorien A und B und dass die Szenarien der Kategorie D signifikant komplexer eingestuft werden als die Szenarien der Kategorien A, B und C. Diese Ergebnisse bestätigen die im vorherigen Kapitel gewonnenen Erkenntnisse für das gesamte Probandenkollektiv. Aufgrund der Verteilung der Probanden stellt sich nun allerdings die Frage, in wie weit das Ergebnis für das gesamte Probandenkollektiv durch die Mehrheit der jungen Probanden beeinflusst wird. Um den Zusammenhang zwischen Altersgruppe, Kategorie und subjektiv empfundener Komplexität umfassend statistisch analysieren zu können, wird vorgeschlagen, eine weitere Studie mit einer höheren Anzahl an Probanden (beispielsweise $n=10$) innerhalb jeder Altersgruppe durchzuführen.

Signifikanztest: U-Test von Mann und Whitney			
paarweiser Vergleich	Prüfgröße U	$U_{krit} (p \leq 0,05, n_1 = 9, n_2 = 9)$	Bedingung: $U \leq U_{krit}$
Kat. A vs. Kat. B	22,00	17,00	nicht erfüllt
Kat. A vs. Kat. C	1,00		erfüllt
Kat. A vs. Kat. D	0,00		erfüllt
Kat. B vs. Kat. C	9,00		erfüllt
Kat. B vs. Kat. D	2,00		erfüllt
Kat. C vs. Kat. D	6,00		erfüllt

Tabelle 5.16: Ergebnisse der paarweisen Vergleiche zwischen den Kategorien der Szenarien für die Altersgruppe jung

5.5.3.4 Statistische Analyse des Parameters Altersgruppe, für jede Kategorie

Außerdem wird innerhalb jeder Kategorie der Einfluss des Alters bzw. der Altersgruppe auf die subjektiv empfundene Komplexität untersucht. Dazu werden die Mediane der drei Altersgruppen für jede Kategorie betrachtet. Die individuelle Mediane der Probanden gruppiert nach Altersgruppe und Kategorie sind im Anhang, Kapitel A7.5 zusammengefasst. Aus den individuellen Medianen der Probanden einer Altersgruppe und einer Kategorie wird die zentrale Tendenz (Mediane) für diese Altersgruppe und für diese Kategorie ermittelt. Im folgenden Bild 5-14 sind die Mediane sowie die Minima und Maxima der drei Altersgruppen für die vier Kategorien dargestellt.

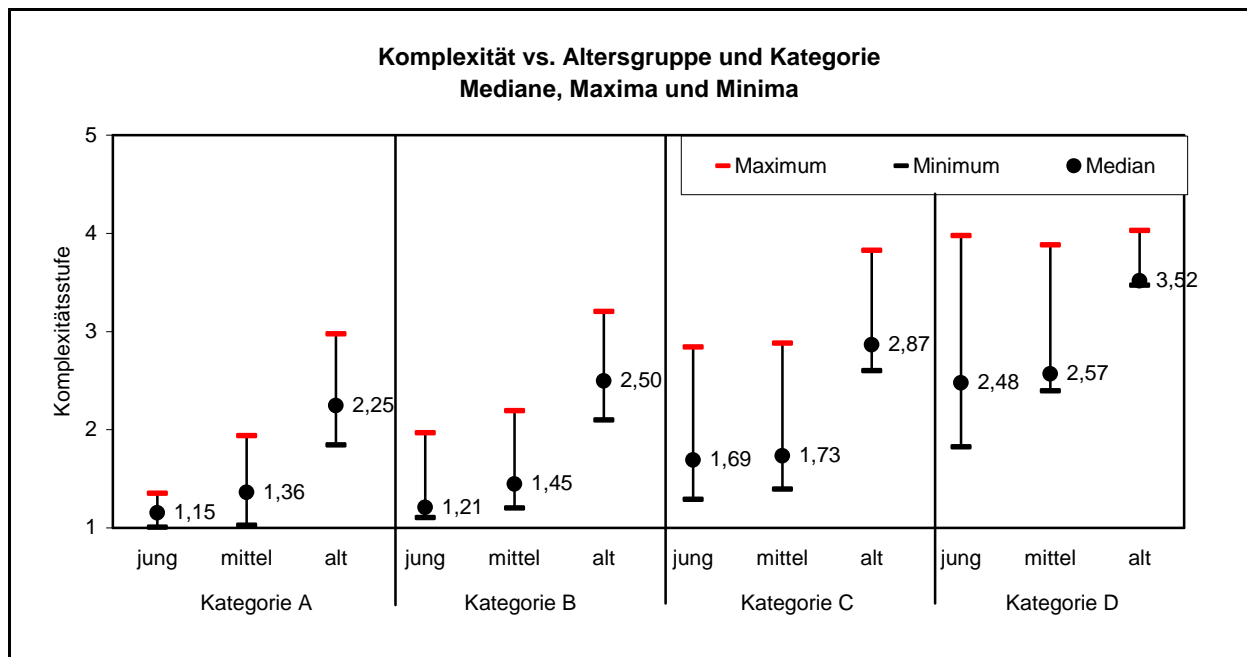


Bild 5-14: Median, Minimum und Maximum für die drei Altersgruppen getrennt nach den vier Kategorien

Beim Vergleich der Altersgruppen hinsichtlich der Lage der Mediane wird deutlich, dass die jungen Probanden im Vergleich zu den älteren Probanden in allen vier Kategorien die Szenarien stets als niedriger komplex einstufen. Die Differenzen zwischen den Medianen der jungen und der alten Probanden sind am größten. Zwischen den jungen Probanden und den Probanden mittleren Alters treten hinsichtlich der Lage der Mediane nur sehr geringe Differenzen auf. Der Zusammenhang zwischen Altersgruppe und subjektiv empfundener Komplexität ist in jeder Kategorie erkennbar. Es lassen sich für jede Kategorie die folgenden zwei Hypothesen formulieren, die Nullhypothese (H0) und die Alternativhypothese (H1).

H0: Die drei Altersgruppen haben hinsichtlich der subjektiv empfundenen Komplexität die gleiche zentrale Tendenz.

H1: Die drei Altersgruppen haben hinsichtlich der subjektiv empfundenen Komplexität nicht die gleiche zentrale Tendenz; sie unterscheiden sich signifikant.

Ob die Nullhypothesen zugunsten der Alternativhypothesen verworfen werden können oder nicht, wird anhand des H-Tests nach Kruskal und Wallis geprüft. (vgl. Kapitel 5.5.2.3) Die ermittelten Werte für die Prüfgrößen Chi-Quadrat, der kritische Chi-Quadrat-Wert auf dem Signifikanzniveau $p \leq 0,05$ und die Ergebnisse des Signifikanztests sind in Tabelle 5.17 zusammengefasst. Für die Kategorien A, B und C ist die Nullhypothese zugunsten der Alternativhypothese zu verwerfen. Der Vergleich der ermittelten Werte mit dem kritischen Tabellenwert in diesen Kategorien zeigt, dass sich die drei Stichproben auf dem gewählten Signifikanzniveau hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz signifikant voneinander unterscheiden. Für die Kategorie D ist die Nullhypothese anzunehmen, denn es ist kein signifikanter Unterschied auf dem gewählten Signifikanzniveau nachweisbar. Die Ergebnisse dieses Test bestätigen zumindest teilweise die bereits in Kapitel

5.5.2.3 gewonnenen Erkenntnisse. Für die Kategorien A, B und C ergibt sich ein Zusammenhang zwischen Altersgruppe und subjektiv empfundener Komplexität. Für die Kategorie D ist dieser Zusammenhang nicht nachweisbar.

Signifikanztest: H-Test nach Kruskal und Wallis			
Kategorie	Prüfgröße Chi-Quadrat	Chi-Quadrat _{krit} (p=0,05, df = 2)	Bedingung: Chi-Quadrat > Chi-Quadrat _{krit}
A	9,345	5,911	erfüllt
B	10,405		erfüllt
C	6,899		erfüllt
D	5,149		<u>nicht</u> erfüllt

Tabelle 5.17: Ergebnisse der Signifikanztests der Gleichheit der Mediane je Altersgruppe für jede Kategorie

Anhand eines paarweisen Vergleichs wird zusätzlich geprüft, welche der drei Stichproben (Altersgruppen) sich im Einzelnen signifikant voneinander unterscheiden. Aufgrund der geringen Differenzen zwischen den Medianen der Altersgruppen jung und mittel in den vier Kategorien wird vermutet, dass zwischen diesen Altersgruppen keine Unterschiede in der Bewertung der subjektiv empfundenen Komplexität bestehen. Allerdings werden größere Differenzen zwischen den Medianen der Altersgruppen jung und alt bzw. mittel und alt deutlich, weshalb in diesen Fällen auf Unterschiede in der Bewertung der Komplexität geschlossen wird. Die folgenden statistischen Analysen beziehen sich auf den Vergleich der Altersgruppe jung und mittel bzw. jung und alt. Aufgrund des zu geringen Stichprobenumfangs innerhalb der Altersgruppen mittel (fünf Probanden) und alt (vier Probanden) muss auf diesen paarweisen Vergleich verzichtet werden.

Der Test erfolgt anhand des U-Tests von Mann und Whitney. (vgl. Kapitel 5.5.2.3) Die berechneten U-Werte, die kritischen U-Werte auf dem Signifikanzniveau $p \leq 0,05$ und die Ergebnisse des Signifikanztests der paarweisen Vergleiche sind in Tabelle 5.18 zusammengefasst. Der Test zeigt für jede Kategorie, dass zwischen den Altersgruppen jung und mittel kein signifikanter Unterschied besteht. Demnach bewerten die jungen Probanden und die Probanden mittleren Alters die Komplexität der Szenarien in jeder Kategorie gleich. Der Vergleich der Altersgruppen jung und alt zeigt hingegen, wie erwartet, dass in jeder Kategorie ein signifikanter Unterschied besteht. Demnach bewerten die älteren Probanden in jeder Kategorie die Szenarien signifikant komplexer als die jungen Probanden. Diese Ergebnisse bestätigen die in Kapitel 5.5.2.3 gewonnenen Erkenntnisse, wonach keine Unterschiede hinsichtlich der subjektiv empfundenen Komplexität zwischen den Altersgruppen jung und mittel existieren und die älteren Probanden die Szenarien tendenziell um eine Komplexitätsstufe höher einstufen als die Probanden der Altersgruppe jung.

Signifikanztest: U-Test von Mann und Whitney				
paarweiser Vergleich	Kategorie	Prüfgröße U	$U_{krit} (p \leq 0,05)$	Bedingung: $U \leq U_{krit}$
jung vs. mittel	A	13,00	7,00 ($n_1 = 5, n_2 = 9$)	<u>nicht</u> erfüllt
	B	9,00		<u>nicht</u> erfüllt
	C	17,00		<u>nicht</u> erfüllt
	D	17,00		<u>nicht</u> erfüllt
jung vs. alt	A	0,00	4,00 ($n_1 = 4, n_2 = 9$)	erfüllt
	B	0,00		erfüllt
	C	2,00		erfüllt
	D	3,00		erfüllt

Tabelle 5.18: Ergebnisse der paarweisen Vergleiche zwischen den Altersgruppen jung und mittel sowie jung und alt für jede Kategorie

5.5.3.5 Diskussion der Ergebnisse

Die statistische Analyse belegt, dass sich die Mediane der vier Kategorien hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz signifikant voneinander unterscheiden. Der paarweise Vergleich zeigt, dass zwischen den Szenarien der Kategorien A und B kein signifikanter Unterschied existiert, jedoch zwischen den Kategorien A und C bzw. D, zwischen B und C bzw. D sowie zwischen C und D. Anhand der Definition der vier Kategorien (vgl. Kapitel 5.1.2) wird deutlich, dass sich mit ansteigender Kategorie die Anzahl der im Szenario enthaltenen Informationen erhöht. In den Kategorien A und B sind wenige Informationen enthalten, in den Kategorien C und D sind viele bis sehr viele Informationen enthalten. Das Ergebnis lässt sich mit der beschränkten Kapazität der Informationsaufnahme und -verarbeitung erklären. Sind nur sehr wenige Informationen im Szenario enthalten, hat der Proband keine Probleme, die Informationen aufzunehmen und zu verarbeiten. Erhöht sich allerdings die Zahl der Informationen, kann der Proband nicht alle Informationen aufnehmen und verarbeiten. Dadurch erhöht sich die subjektiv empfundene Komplexität des Szenarios im Hinblick auf die Wahrnehmbarkeit von Verkehrszeichen.

Die statistische Analyse des Zusammenhangs zwischen Kategorie und Komplexität für jede Altersgruppe belegt, dass sich die Mediane der vier Kategorien auch innerhalb jeder Altersgruppe hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz signifikant voneinander unterscheiden. Der paarweise Vergleich erfolgt aufgrund statistischer Randbedingungen nur in der Altersgruppe jung. Die Ergebnisse dieses Vergleichs bestätigen die oben beschriebenen Ergebnisse für das gesamte Probandenkollektiv. Es wird jedoch angemerkt, dass das Ergebnis für das gesamte Probandenkollektiv zum Teil auch durch die Mehrheit der jungen Probanden beeinflusst wird. Um den Zusammenhang zwischen Altersgruppe, Kategorie und subjektiv empfundener Komplexität umfassend statistisch analysieren zu können, wird vorgeschlagen, eine weitere Studie mit einer höheren Anzahl an Probanden innerhalb jeder Altersgruppe (beispielsweise $n = 10$) durchzuführen. Eine Erklärung des Zusammenhangs zwischen Kategorie und subjektiv empfundener Komplexität innerhalb jeder Altersgruppe liefert wiederum die beschränkte Kapazität der Informationsaufnahme und -verarbeitung des Menschen.

Die statistische Analyse des Zusammenhangs zwischen Komplexität und Altersgruppe innerhalb jeder Kategorie dokumentiert, dass in den Kategorien A, B und C ein signifikanter Unterschied zwischen den Altersgruppen existiert, in der Kategorie D allerdings nicht. Die Ergebnisse für die Kategorien A, B und C sind nachvollziehbar. Es stellt sich nun allerdings die Frage, weshalb in der Kategorie D kein signifikanter Unterschied ermittelt werden konnte. Beim Vergleich der Maxima-Werte für die Altersgruppe alt in der Kategorie D mit den Maxima-Werten für die Altersgruppen jung und mittel in der Kategorie D wird deutlich, dass die Maxima-Werte kaum Differenzen aufzeigen. (vgl. Bild 5-14) Im Hinblick auf die Ergebnisse der anderen Kategorien war zu erwarten, dass die älteren Probanden die Szenarien der Kategorie D komplexer bewerten. Warum bewerten die älteren Probanden die Komplexität dieser Szenarien nicht so hoch? Eine mögliche Erklärung liefert die nachlassende Leistungsfähigkeit des Gehirns im Alter. Demnach können ältere Menschen nicht mehr so viele Informationen verarbeiten wie jüngere. Die Folge ist ein „Übersehen“ der Informationen, die nicht verarbeitet werden; den älteren Menschen geht somit ein Teil der Informationen verloren und die „wahre“ Komplexität des Szenarios wird nicht erfasst. Der paarweise Vergleich erfolgt aufgrund statistischer Randbedingungen nur zwischen den Altersgruppen jung und mittel sowie jung und alt. Der Test zeigt, dass zwischen den Altersgruppen jung und mittel in jeder Kategorie kein signifikanter Unterschied besteht. Demnach bewerten die jungen Probanden und die Probanden mittleren Alters die Komplexität der Szenarien gleich. Für den Vergleich der Altersgruppen jung und alt wird allerdings wie erwartet in jeder Kategorie ein signifikanter Unterschied auf dem gewählten Signifikanzniveau nachgewiesen. Demnach bewerten die älteren Probanden in jeder Kategorie die Szenarien komplexer als die jungen Probanden. Dieses Ergebnis lässt sich, wie bereits beschrieben, zum Einen mit der nachlassenden Leistungsfähigkeit des Gehirns bei zunehmendem Alter erklären, zum Anderen mit dem vermuteten „Unwohlsein“ der älteren Probanden während der Fahrten bei Dunkelheit. (vgl. Kapitel 5.5.2.4) Um alle paarweisen Vergleiche statistisch analysieren zu können, wird auch an dieser Stelle angeregt, eine weitere Studie mit einer höheren Anzahl an Probanden innerhalb jeder Altersgruppe (beispielsweise $n = 10$) durchzuführen.

5.5.4 Zusammenfassung

Die im Untersuchungsabschnitt I gewonnenen Daten beschreiben das subjektive Empfinden von 18 Probanden unter Laborbedingungen. Auch wenn das Lichtlabor den lichttechnischen Bedingungen des nächtlichen Straßenverkehrs entspricht und die physiologischen Anforderungen des Auges berücksichtigt, ist davon auszugehen, dass der reale Straßenverkehr und das Führen eines Fahrzeugs zusätzliche Belastungspotentiale für den Fahrer darstellen. Aus diesem Grund wird vermutet, dass die subjektiv empfundene Komplexität in verschiedenen Situationen im realen Straßenverkehr höher bewertet wird als im Labor. Daher wird diese Untersuchung und ihre Ergebnisse als Vorstudie zu einer ergänzenden umfangreicheren Feldstudie betrachtet, die in Zukunft durchgeführt werden sollte.

Die statistischen Analysen der im Untersuchungsabschnitt I gewonnenen Daten erfolgen hinsichtlich verschiedener Parameter. Aufgrund der geringen Stichprobenumfänge innerhalb der Altersgruppen mittel und alt bzw. anderer Ausprägungen (beispielsweise Fahrleistung, Nachtanteil) sind verschiedene statistische Analysen

für diese Ausprägungen nicht durchführbar. Um alle Parameter umfassend statistisch analysieren zu können, wird ebenfalls eine weitere Studie (Feldstudie) mit einer höheren Anzahl an Probanden innerhalb der Ausprägungen angeregt.

Anhand der durchgeführten statistischen Analysen wird nachgewiesen, dass die Altersgruppe sowie die Kategorie der Szenarien den größten Einfluss auf die subjektiv empfundene Komplexität ausüben. Demnach stufen ältere Probanden die Szenarien um etwa eine Komplexitätsstufe höher ein als die jungen Probanden. Szenarien mit vielen Informationen (Kategorien C und D) werden um bis zu 1,3 Komplexitätsstufen höher eingestuft als Szenarien mit wenigen Informationen (Kategorien A und B). Der Einfluss der Altersgruppe bzw. des Alters lässt sich zum Einen auf die nachlassende Leistungsfähigkeit des Gehirns zurückführen. Demnach können ältere Menschen nicht mehr so viele Informationen verarbeiten wie jüngere. Sie fühlen sich mit einer zu großen Anzahl an Informationen überfordert und stufen daher die subjektiv empfundene Komplexität höher ein. Zum Anderen wird vermutet, dass sich ältere Probanden während Fahrten bei Dunkelheit „unwohl“ fühlen. Dieses Unwohlsein ist auf verschiedene physiologische Einschränkungen im Alter zurück zu führen, wodurch eine Fahrt bei Dunkelheit für den älteren Fahrer eine belastende Situation darstellen kann.

Zwischen den Parametern Geschlecht sowie Fahrleistung innerhalb der letzten 12 Monate und der subjektiv empfundenen Komplexität ist kein Zusammenhang nachweisbar. Ein geschlechtsspezifischer Einfluss ist auszuschließen, da sich dieser eher auf emotionaler Ebene abspielt. Auch hinsichtlich der Fahrleistung wird kein Zusammenhang zur subjektiv empfundenen Komplexität erwartet. Alle Probanden hatten seit mehr als sieben Jahren den Führerschein und demnach genügend Fahrerfahrung. Zudem haben alle Probanden innerhalb der letzten 12 Monate aktiv am Straßenverkehr teilgenommen.

Obwohl der Einfluss des Anteils der Nachtfahrten innerhalb der letzten 12 Monate auf die subjektiv empfundene Komplexität nachweisbar ist, wird aufgrund der Form der Verteilung (umgedrehte U-Form) davon ausgegangen, dass es sich hierbei nur um ein statistisches Ergebnis handelt und dass dieser Unterschied auf die Verteilung der Probanden hinsichtlich der Altersgruppen zurückzuführen ist. Daher wird angeregt, auch diesen Parameter in einer weiteren Studie zu untersuchen. Es wird vermutet, dass die Probanden mit einem hohen Anteil an Nachtfahrten die subjektiv empfundene Komplexität geringer einschätzen, da sie auf einen größeren Erfahrungsschatz (bezogen auf Fahrten bei Dunkelheit) zurückgreifen können. Dabei ist sehr interessant, zu analysieren, ob die älteren Probanden aufgrund des „nächtlichen“ Erfahrungsschatzes die altersbedingten Einschränkungen kompensieren können.

Ein weiterer, jedoch primär untersuchungstechnischer Einfluss ist der Einfluss der Wiederholung. Es ist statistisch nachgewiesen, dass die Probanden die Szenarien im ersten Durchgang um ca. 0,3 Komplexitätsstufen höher einstufen als im zweiten Durchgang. Es wird vermutet, dass diese Differenz auf die anfängliche Unerfahrenheit der Probanden im Umgang mit der Untersuchung zurückzuführen ist. Bereits nach dem zweiten Untersuchungsdurchgang scheint im Vergleich zu den folgenden Untersuchungsdurchgängen, dass der „Lernprozess“ für das gesamte Probandenkollektiv aus statistischer Sicht abgeschlossen ist. Die geringen Differenzen zwischen den Medianen der zweiten bis vierten Durchgänge werden auf

subjektive psychologische Faktoren, wie beispielsweise Motivation, Belastung, Müdigkeit usw. zurückgeführt. Da die einzelnen Szenarien den Probanden nur für einen kurzen Zeitraum präsentiert wurden und es sich um eine große Anzahl an Szenarien handelt, wird der Einfluss der Bekanntheit auf die subjektiv empfundene Komplexität als eher gering eingeschätzt.

5.6 Auswertung des Untersuchungsabschnitts II

5.6.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des Untersuchungsabschnitts II dargestellt. Dabei wird in Abhängigkeit von der Altersgruppe und der Komplexität des Szenarios die Qualität der Ausübung der Hauptaufgabe (Signal-Entdeckungs-Versuche) und der Nebenaufgabe (Tracking-Aufgabe) betrachtet.

Die Daten der Altersgruppe alt zeigen, dass zwischen den Probanden über 60 Jahre und den Probanden über 75 Jahre deutliche Unterschiede vorhanden sind. Aus diesem Grund werden die Probanden über 75 Jahre, die zudem nur an einem Untersuchungstag teilnehmen konnten, einer separaten Altersgruppe, der Altersgruppe alt* zugeordnet. Somit werden auch die altersbedingten Einflüsse dieser zusätzlichen Altersgruppe genauer betrachtet.

In etwa der Hälfte der gezeigten Szenarien waren Geschwindigkeitsbegrenzungsschilder vorhanden, manuell mithilfe eines geeigneten Bildbearbeitungsprogramms eingefügt. Trotz des Hinweises, dass nicht in allen Szenarien Geschwindigkeitsbegrenzungsschilder enthalten sind, wird angenommen, dass die Probanden beim Fehlen des Geschwindigkeitsbegrenzungsschildes zu erhöhtem Suchverhalten neigen. Es wird vermutet, dass dieses Suchverhalten zusätzlich zur subjektiv empfundenen Komplexität des Szenarios die Lösung der Nebenaufgabe beeinflusst. Demnach wird für die folgende Auswertung nicht der gesamte Datenpool verwendet, sondern nur die Bildfolgen, in denen sich tatsächlich Geschwindigkeitsbegrenzungsschilder befinden.

Im Folgenden wird zunächst analysiert, wie die Probanden in Abhängigkeit von der Altersgruppe (jung, mittel, alt und alt*) die Haupt- und die Nebenaufgaben lösen. Im Anschluss daran werden relevante Bildfolgen ausgewählter Probanden hinsichtlich des Einflusses der Komplexität des Szenarios auf die Lösung der Nebenaufgabe ausgewertet.

5.6.2 Übersicht über die Daten der Haupt- und Nebenaufgabe

5.6.2.1 Allgemeines

Um beide Aufgaben lösen zu können, müssen die Probanden ihre Aufmerksamkeit entsprechend der Aufgabenverteilung teilen; der Hauptaufgabe wird dabei der größere Anteil der Aufmerksamkeit geschenkt, der Nebenaufgabe ein geringerer. Für jeden der 23 Probanden war dieser Untersuchungsablauf zunächst neuartig und ungewohnt. Zudem ist bekannt, dass bei älteren Menschen aufgrund der begrenzten Verarbeitungskapazität die Fähigkeit, die Aufmerksamkeit zu teilen, erschwert ist. Demnach können ältere Menschen insbesondere bei sehr komplexen Aufgaben nicht mehr beide Informationen gleichzeitig aufnehmen und verarbeiten, ein Verlust von

Informationen insbesondere in der Nebenaufgabe ist die Folge. Wie groß der Einfluss des Alters dabei ist, hängt insbesondere von der Kombination der Aufgaben sowie von dessen Schwierigkeitsgrad ab. [ABENDROTH, 2001]

Um den Schwierigkeitsgrad der Nebenaufgabe den altersabhängigen Anforderungen anzupassen, wurde die Testgeschwindigkeit der Nebenaufgabe für die Probanden der Altersgruppen alt und alt* entsprechend angepasst. Zudem gaben alle Probanden an, mit der Bedienung der PC-Maus vertraut zu sein, so dass dies keine zusätzliche Belastung darstellt. Für die folgende Analyse wird angenommen, dass die Schwierigkeit der Nebenaufgabe für alle Probanden vergleichbar ist und die Unterschiede der Ergebnisse auf der Belastung durch die Hauptaufgabe basieren.

5.6.2.2 Die Hauptaufgabe

Die Lösung der Hauptaufgabe, also die Wahrnehmung von Verkehrszeichen (hier Geschwindigkeitsbegrenzungsschilder), ist getrennt nach Altersgruppe und Durchgang in Bild 5-15 zusammengefasst. Dabei berechnet sich der prozentuale Anteil der richtig wahrgenommenen Verkehrszeichen (Abk. VZ) einer Altersgruppe aus den einzelnen Anteilen jedes dieser Altersgruppe zugehörigen Probanden.

Es ist erkennbar, dass die jungen Probanden die Hauptaufgabe in allen betrachteten Durchgängen (2 bis 4) zu annähernd 100% lösen. Die Probanden mittleren Alters nehmen über 97% der Verkehrszeichen wahr. Für die Altersgruppen alt und alt* ist erkennbar, dass die Verringerung der Testgeschwindigkeit zu einer besseren Lösung der Hauptaufgabe führt. Demnach können die Probanden der Altersgruppe alt bei verminderter Testgeschwindigkeit über 96% der Verkehrszeichen wahrnehmen, ähnlich den Probanden mittleren Alters. Allerdings können die Probanden über 75 Jahre (Altersgruppe alt*) trotz verminderter Testgeschwindigkeit „nur“ 80% der Verkehrszeichen wahrnehmen. Gründe dafür sind zum Einen, dass die Verminderung der Testgeschwindigkeit für die Probanden über 75 Jahre noch nicht ausreicht, um deren Verlust des Apperzeptionsvermögens auszugleichen und zum Anderen, dass die Wahrnehmung von Objekten durch die fortgeschrittenen altersbedingten physiologischen Veränderungen (beispielsweise höhere Blendempfindlichkeit, verringerte Dämmerungssehschärfe) weiter eingeschränkt ist und sich die Probanden daher bei Dunkelheit „unwohl“ fühlen, wodurch die Beanspruchung zusätzlich rein psychologisch ansteigt. (vgl. Kapitel 4.6.2 und 5.5.2)

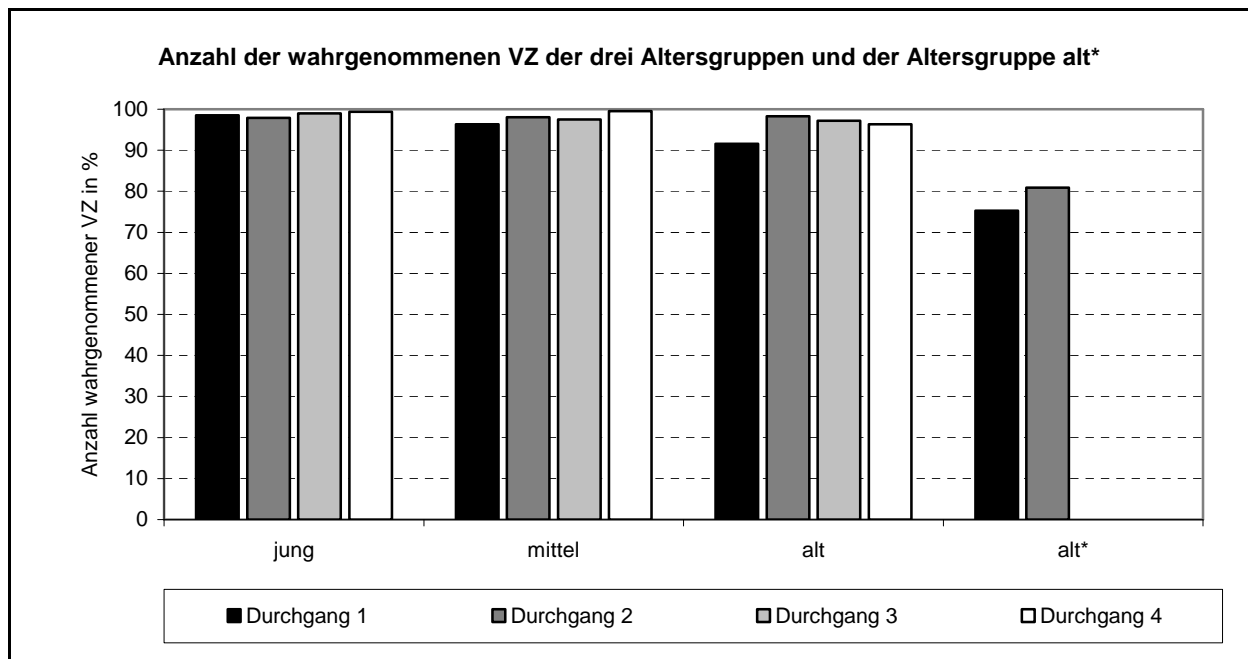


Bild 5-15: Lösung der Hauptaufgabe der drei Altersgruppen

5.6.2.3 Die Nebenaufgabe

In Bild 5-16 ist für jede Altersgruppe (jung, mittel, alt und alt*) für jeweils jeden der vier Durchgänge die Qualität der Lösung der Tracking-Aufgabe dargestellt. Dabei gibt der Zeitanteil (in Prozent) an, wie häufig der blaue Balken zwischen die weißen Balken navigiert wurde, also die Nebenaufgabe gelöst wurde. Die Werte für jeden Durchgang berechnen sich aus der Lösung der Nebenaufgabe jedes dieser Altersgruppe zugehörigen Probanden.

Für alle vier Altersgruppen ist erkennbar, dass die Werte für Durchgang 1 im Vergleich zu den anderen drei Durchgängen auffallend niedriger liegen. Mögliche Gründe dafür sind zum Einen, dass einige Probanden diesen Durchgang trotz vorherigem Probelauf als zusätzlichen Übungslauf nutzten. Zum Anderen wurde dieser Durchgang insbesondere in den Altersgruppen alt und alt* zur Wahl der Testgeschwindigkeit in der Tracking-Aufgabe genutzt. Diese betrug 2/3 der Geschwindigkeit, mit der die Probanden der anderen beiden Altersgruppen (jung, mittel) diese Aufgabe lösten. Aufgrund dieser Einflüsse werden in allen Altersgruppen die Daten aus Durchgang 1 bei den folgenden Auswertungen der Nebenaufgabe nicht betrachtet.

Des Weiteren ist erkennbar, dass die jungen Probanden die Nebenaufgabe in allen Durchgängen (2 bis 4) zu annähernd 100% lösen, die Probanden mittleren Alters lösen die Nebenaufgabe in den drei Durchgängen zu über 95%. Nach Verminderung der Testgeschwindigkeit lösen die Probanden der Altersgruppe alt die Nebenaufgabe zu über 92%, die Probanden der Altersgruppe alt* zu über 87%. Anhand dieser Ergebnisse wird deutlich, dass mit zunehmendem Alter die Lösung der Nebenaufgabe erschwert ist, ab 60 Jahre und insbesondere ab 75 Jahre. Gründe dafür sind die verminderte Leistungsfähigkeit des Gehirns, wodurch zum Einen die Beanspruchung in der Hauptaufgabe steigt, zum Anderen die Fähigkeit, die Aufmerksamkeit zu teilen, abnimmt. Demnach können, insbesondere bei sehr umfassenden Aufgaben (beispielsweise hoch komplexe Szenarien), die Informationen beider Aufgaben nicht mehr gleichzeitig aufgenommen werden und

ein Teil der Informationen (beispielsweise Stellung der weißen und des blauen Balkens) geht verloren.

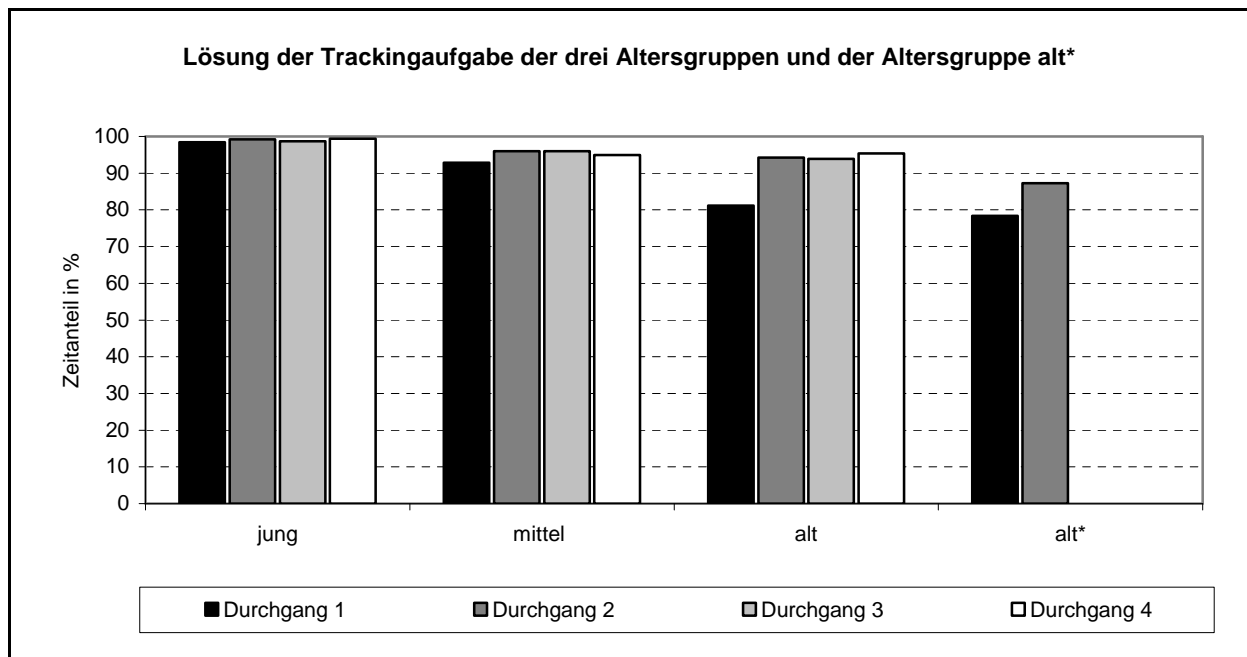


Bild 5-16: Lösung der Nebenaufgabe der drei Altersgruppen

5.6.3 Der Einfluss der Komplexität auf die Nebenaufgabe

5.6.3.1 Allgemeines

Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen Komplexität des Szenarios und der resultierenden Beanspruchung des Fahrers analysiert. Es wird angenommen, dass sehr komplexe Szenarien die Probanden stärker beanspruchen als wenig komplexe Szenarien, weshalb die Probanden den überwiegenden Teil ihrer Aufmerksamkeit für die Wahrnehmung der Verkehrszeichen einsetzen können.

Die Auswertung der Daten erfolgt getrennt nach den vier Altersgruppen und jeweils für jeden der 23 Probanden. Für die Probanden, die bereits im ersten Untersuchungsabschnitt teilnahmen, werden als Komplexitätswerte der einzelnen Szenarien die individuellen Daten des Probanden aus dem Untersuchungsabschnitt I eingesetzt. Dafür wird für jeden Probanden aus der achtfachen Bewertung jedes Szenarios des Untersuchungsabschnitts I der subjektive Medianwert für dieses Szenario berechnet. Für die im Untersuchungsabschnitt II zusätzlichen Probanden wird jeweils der Medianwert jedes Szenario des Untersuchungsabschnitts I der Altersgruppe, der sie angehören, eingesetzt. Für die Probanden der Altersgruppe alt* werden dabei die Daten der Altersgruppe alt herangezogen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass deren subjektiv empfundene Komplexität aufgrund des höheren Alters höher liegt.

Aufgrund der bereits beschriebenen Problematik des Suchverhaltens bei Fehlen eines Verkehrszeichens und der daraus zur Verfügung stehenden eingeschränkten Datenmenge, können keine belastbaren Ergebnisse erzielt werden, die formulierten Aussagen sind als richtungsweisend zu betrachten.

5.6.3.2 Altersgruppe jung

In Bild 5-17 ist die Lösung der Nebenaufgabe für jeden Probanden der Altersgruppe jung getrennt nach den vier Durchgängen und in den betrachteten Bildfolgen dargestellt. Aus bereits geschilderten Gründen werden nur die Durchgänge 2 bis 4 bewertet. Es ist erkennbar, dass mit Ausnahme des Probanden 2 im Durchgang 3 alle Probanden die Nebenaufgabe in allen Durchgängen zu über 98% erfüllen. Die geringen Abweichungen der einzelnen Probanden lassen sich mit der Unaufmerksamkeit der Probanden begründen. Im Folgenden wird für Durchgang 3 des Probanden 2 die Lösung der Nebenaufgabe in Abhängigkeit von der Komplexität des Szenarios betrachtet und somit die Beanspruchung des Fahrers analysiert.

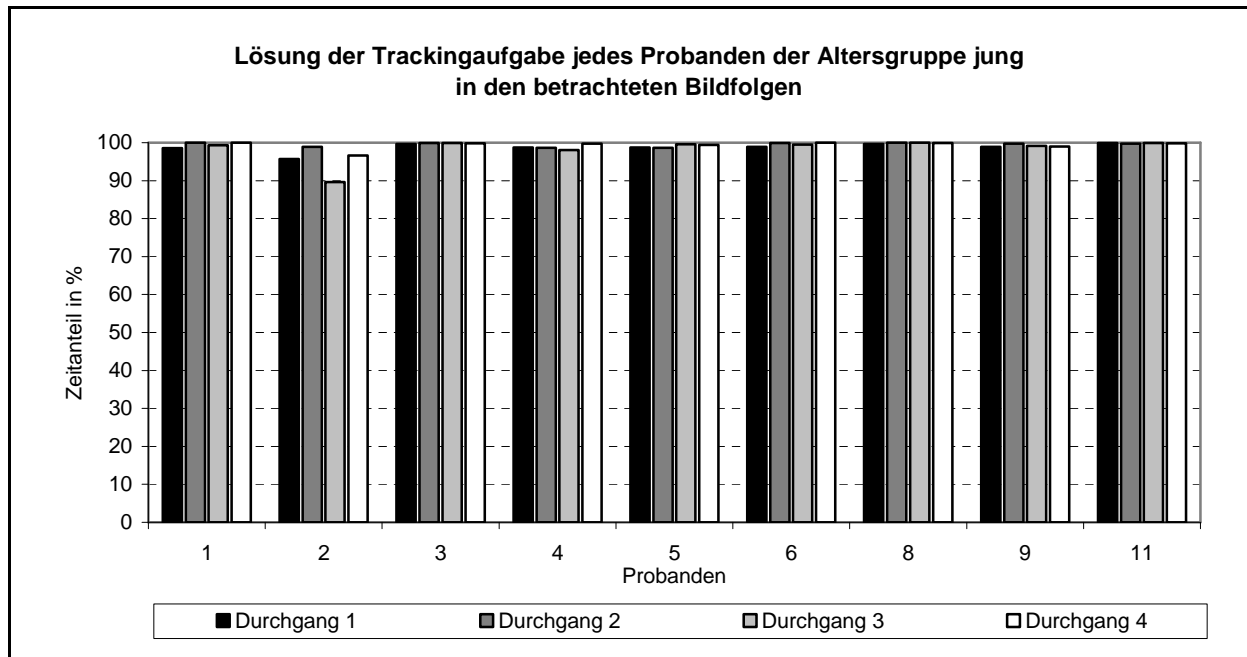


Bild 5-17: Lösung der Nebenaufgabe für jeden Probanden der Altersgruppe jung

In Bild 5-18 sind die Ergebnisse für Proband 2 dargestellt. Das Diagramm ist zweigeteilt aufgebaut. Auf der linken y-Achse sind für jedes Szenario die prozentualen Zeitanteile aufgetragen, in denen die Nebenaufgabe nicht erfüllt wird. Auf der rechten y-Achse sind die individuellen Komplexitätswerte des Szenarios aufgetragen, wobei diese im Diagramm der Größe nach geordnet sind. Zunächst ist kein direkter Zusammenhang zwischen Erfüllung der Nebenaufgabe und Komplexität des Szenarios ⁱ¹⁵ zu erkennen. Es gibt sowohl wenig komplexe als auch hoch komplexe Szenarien, in denen die Nebenaufgabe erfüllt oder auch nicht erfüllt wird. Für die weitere Auswertung werden die in Tabelle 5.19 definierten drei Komplexitätsbereiche betrachtet.

¹⁵ „i“ steht für das augenblickliche Szenario

Komplexitätsbereich	Definition	Beanspruchung
KB I	$K_{SE} < 2,5$	niedrig
KB II	$2,5 \leq K_{SE} < 3,5$	mittel
KB III	$3,5 \leq K_{SE}$	hoch

Tabelle 5.19: Definition der drei Komplexitätsbereiche

Die drei Bereiche sind in Bild 5-18 durch rote Markierungen optisch voneinander getrennt. Beim Vergleich der Häufigkeit des Auftretens der Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe innerhalb der drei Bereiche, ohne den Zeitanteil einzubeziehen, wird folgendes Ergebnis deutlich: In den Szenarien der Bereiche I und II erfüllt Proband 2 die Nebenaufgabe in jeweils der Hälfte der Szenarien nicht. Steigt die Komplexität der Szenarien allerdings über den Wert von 3,5, so erhöht sich die Häufigkeit der Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe auf über 80%.

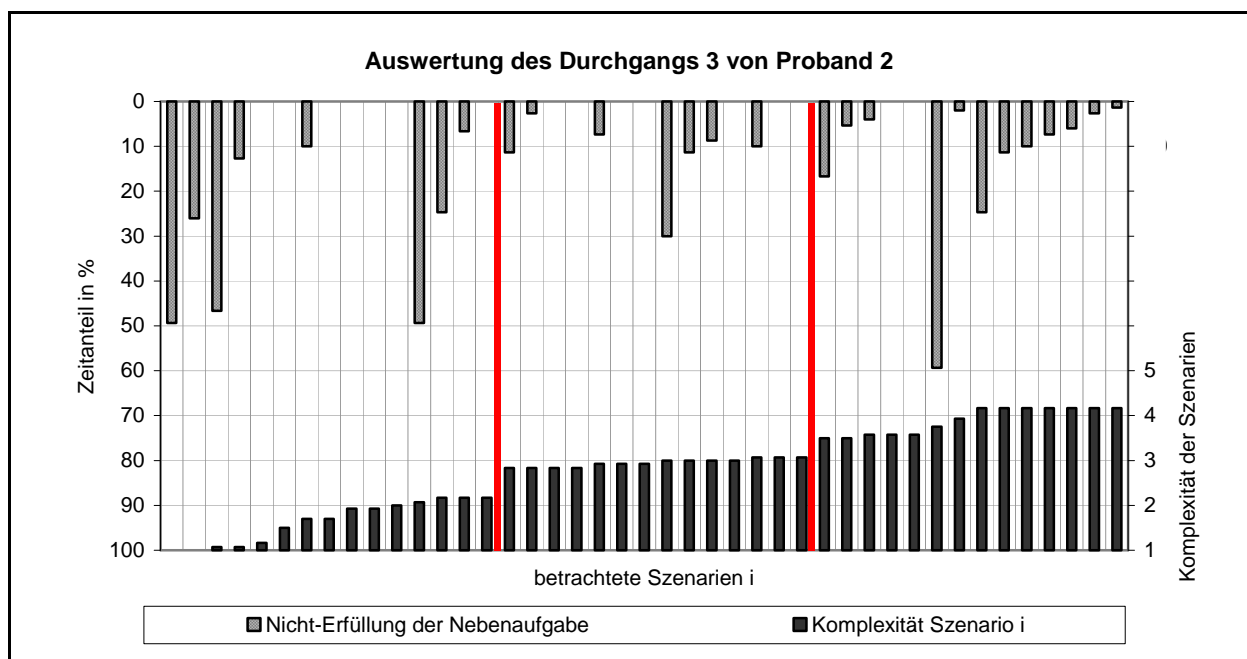


Bild 5-18: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 2, Durchgang 3

Des Weiteren wird angenommen, dass auch die Komplexität des vorherigen Szenarios ($i-1$ ¹⁶) den Fahrer beansprucht und somit die Erfüllung der Nebenaufgabe beeinflusst. Im folgenden Bild 5-19 ist dieser Zusammenhang graphisch dargestellt. Zunächst ist auch hierbei kein direkter Zusammenhang zwischen Erfüllung der Nebenaufgabe und Komplexität des vorherigen Szenarios zu erkennen. Es gibt sowohl wenig komplexe als auch hoch komplexe Szenarien, denen eine nicht erfüllte Nebenaufgabe folgt. Werden die zuvor beschriebenen drei Bereiche hinsichtlich der Komplexität, ohne den Zeitanteil zu berücksichtigen, betrachtet und miteinander verglichen, so wird Folgendes deutlich: In den Szenarien der Bereiche I und II kann Proband 2 die Nebenaufgabe im folgenden Szenario in jeweils 60% der Fälle nicht erfüllen. Steigt die Komplexität der Szenarien allerdings über den Wert von 3,5, so

¹⁶ „i-1“ steht für das vorherige Szenario

erhöht sich die Häufigkeit der Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe im folgenden Szenario auf über 75%.

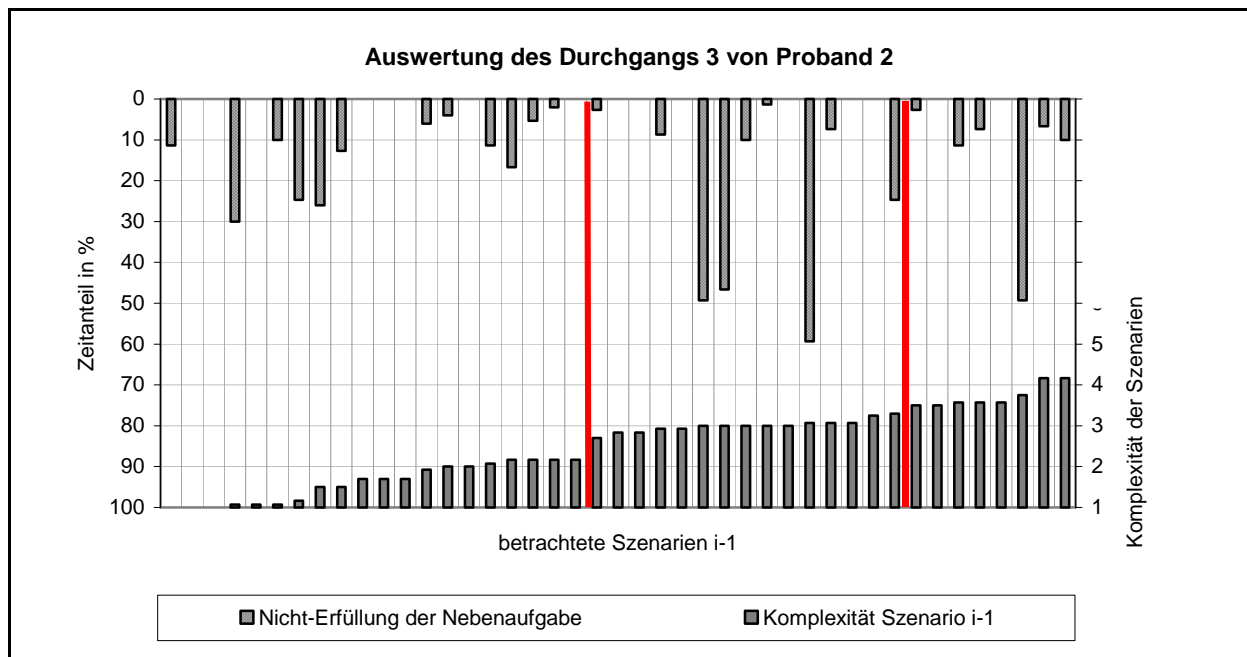


Bild 5-19: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 2, Durchgang 3

Zusammenfassend wird deutlich, dass die Mehrheit der jungen Probanden keinen Zusammenhang zwischen der Beanspruchung des Probanden in der Hauptaufgabe (Komplexität der Szenarien) und der Lösung der Nebenaufgabe aufzeigt. Für Proband 2, Durchgang 3 wurde der Ablauf der Analyse der Daten beispielhaft beschrieben. Es ist allerdings davon auszugehen, dass dieses Ergebnis auf andere kurzfristig wirkende fahrerspezifische Einflussparameter, wie beispielsweise Müdigkeit zurückzuführen ist.

5.6.3.3 Altersgruppe mittel

Für jeden Probanden der Altersgruppe mittel getrennt nach den vier Durchgängen ist die Lösung der Nebenaufgabe in Bild 5-20 dargestellt. Auch für die Altersgruppe mittel ist erkennbar, dass einige Probanden die Nebenaufgabe zu annähernd 100% lösen und andere Probanden Probleme haben, die Nebenaufgabe zu erfüllen. Grundsätzlich lösen alle Probanden mittleren Alters die Nebenaufgabe in den betrachteten Durchgängen (2 bis 4) zu über 90% (Ausnahme Proband 18, Durchgang 4). Für die Probanden 10 und 14 ist kein Zusammenhang zwischen Beanspruchung in der Hauptaufgabe und Lösung der Nebenaufgabe zu erkennen. Im Folgenden wird für die anderen sechs Probanden (7, 17 bis 21) die Lösung der Nebenaufgabe in Abhängigkeit von der Komplexität des Szenarios analysiert. Dabei wird wie im vorangegangenen Kapitel zunächst der Einfluss der Komplexität des derzeitigen Szenarios betrachtet, danach der Einfluss der Komplexität des vorherigen Szenarios. Die graphische Darstellung des Zusammenhangs Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i bzw. Szenario i-1 für jeden der sechs Probanden und jeden betrachteten Durchgang ist im Anhang, Kapitel A8.1 zusammengefasst.

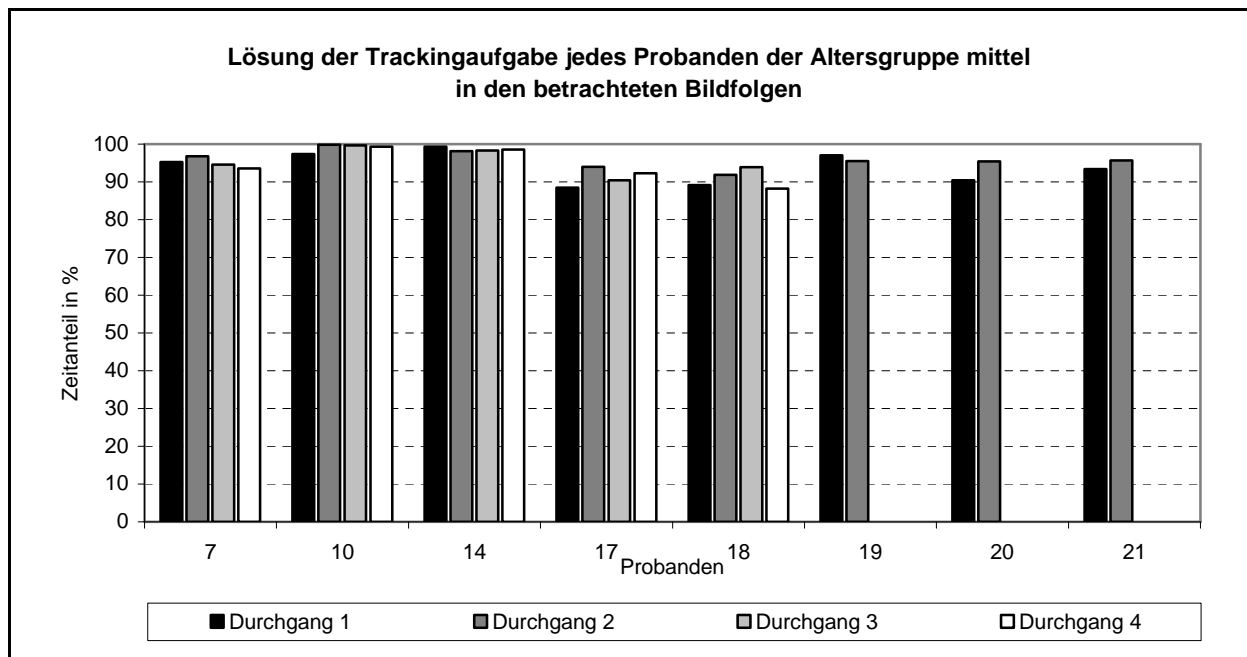


Bild 5-20: Lösung der Nebenaufgabe für jeden Probanden der Altersgruppe mittel

In Tabelle 5.20 ist dargestellt, wie häufig die einzelnen Probanden in den betrachteten Durchgängen die Nebenaufgabe nicht erfüllen, jeweils in Abhängigkeit vom Komplexitätsbereich des aktuellen Szenarios i. Es ist erkennbar, dass zum Einen sich das Verhalten einzelner Probanden von einem Durchgang zum anderen verändert (intrapersonell) und zum Anderen die Probanden im Vergleich (interpersonell) ein sehr unterschiedliches Verhalten aufweisen. Nur in zwei Durchgängen (grau eingefärbt) ist ein Anstieg der Häufigkeit der Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe mit zunehmender Komplexität des Szenario i zu verzeichnen. Ein genereller Zusammenhang zwischen der Komplexität des Szenarios (i) und der Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe in diesem Szenario ist nicht erkennbar.

Bereiche Probanden	Durchgang 2			Durchgang 3			Durchgang 4		
	KB I	KB II	KB III	KB I	KB II	KB III	KB I	KB II	KB III
7	30	8	38	52	33	0	44	17	25
17	46	38	.*	43	57	.*	50	38	.*
18	33	33	60	29	30	43	56	62	47
19	44	20	33						
20	34	60	33						
21	34	30	33						

.* Proband hat keines der Szenarien im UAI mit $K_{SE} > 3,5$ bewertet

Tabelle 5.20: Häufigkeitsverteilung der Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe in Abhängigkeit der Komplexität des Szenarios i für die Probanden der Altersgruppe mittel

In Tabelle 5.21 ist für jeden Probanden und jeden betrachteten Durchgang die Häufigkeit der Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe in Abhängigkeit vom Komplexitätsbereich des vorherigen Szenarios (i-1) aufgeführt. Vergleichbar mit dem zuvor beschriebenen Zusammenhang sind auch hier große intrapersonelle und

interpersonelle Unterschiede zu erkennen. Nur in drei Durchgängen (grau eingefärbt) ist ein Anstieg der Häufigkeit der Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe mit zunehmender Komplexität des Szenario i-1 zu verzeichnen. Auch zwischen der Komplexität des Szenarios (i-1) und der Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe im folgenden Szenario ist kein Zusammenhang erkennbar.

Bereiche Probanden	Durchgang 2			Durchgang 3			Durchgang 4		
	KB I	KB II	KB III	KB I	KB II	KB III	KB I	KB II	KB III
7	24	40	0	35	33	57	48	13	29
17	42	60	-*	43	60	-*	46	60	-*
18	44	62	27	25	33	60	67	44	58
19	37	25	50						
20	40	38	50						
21	29	50	50						

-* Proband hat keines der Szenarien im UAI mit $K_{SE} > 3,5$ bewertet

Tabelle 5.21: Häufigkeitsverteilung der Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe in Abhängigkeit der Komplexität des Szenarios i-1 für die Probanden der Altersgruppe mittel

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Probanden mittleren Alters im Vergleich zu den jungen Probanden bei der Erfüllung der Nebenaufgabe geringfügig Probleme aufweisen. In der vorliegenden Arbeit ist jedoch kein Zusammenhang zwischen Beanspruchung in der Hauptaufgabe und Lösung der Nebenaufgabe für die Altersgruppe mittel nachweisbar. Ob dieses Ergebnis auf die geringe Datenmenge zurückzuführen ist oder ob in diesem Alter die Fähigkeit der Aufmerksamkeitsteilung nur geringfügig eingeschränkt ist, kann an dieser Stelle jedoch nicht ausreichend geklärt werden. Dazu bedarf es weiterer Forschung.

5.6.3.4 Altersgruppen alt und alt*

Für die Probanden der Altersgruppen alt und alt* ist die Lösung der Nebenaufgabe getrennt nach den vier Durchgängen in Bild 5-21 dargestellt. Die Probanden der Altersgruppe alt lösen nach Verminderung der Testgeschwindigkeit die Nebenaufgabe, vergleichbar mit den Probanden der Altersgruppe mittel, zu über 90% (Ausnahme Proband 13, Durchgang 3). Die Probanden der Altersgruppe alt* hingegen können trotz verminderter Testgeschwindigkeit die Nebenaufgabe nur zu über 80% lösen. Im Folgenden wird für alle Probanden die Lösung der Nebenaufgabe in Abhängigkeit vom Komplexitätsbereich des Szenarios analysiert, zunächst bezogen auf das derzeitige Szenario danach auf das vorherige Szenario. Die graphische Darstellung des Zusammenhangs Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe gegenüber der Komplexität des Szenario i bzw. des Szenario i-1 für jeden Probanden und jeden betrachteten Durchgang ist im Anhang, Kapitel A8.2 zusammengefasst.

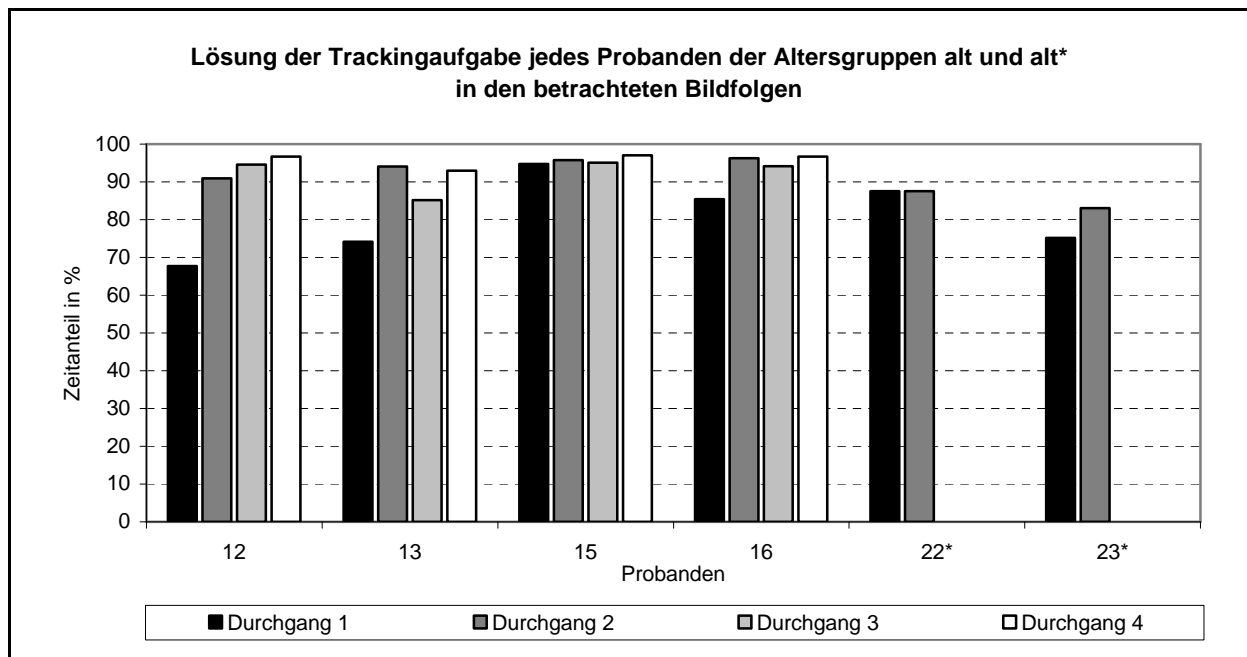


Bild 5-21: Lösung der Nebenaufgabe für jeden Probanden der Altersgruppen alt und alt*

In der folgenden Tabelle 5.22 ist die Häufigkeit der Nichterfüllung der Nebenaufgabe für jeden Probanden der Altersgruppen alt und alt* dargestellt. Es ist wiederum erkennbar, dass große intrapersonelle und interpersonelle Unterschiede auftreten. Nur in vier Durchgängen (grau eingefärbt) ist ein Anstieg der Häufigkeit mit zunehmender Komplexität zu verzeichnen, wobei dieser nur in der Altersgruppe alt auftritt. Ein genereller Zusammenhang zwischen der Komplexität des aktuellen Szenarios (i) und der Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe ist nicht erkennbar.

Bereiche Probanden	Durchgang 2			Durchgang 3			Durchgang 4		
	KB I	KB II	KB III	KB I	KB II	KB III	KB I	KB II	KB III
12	27	33	33	48	17	17	19	27	67
13	17	13	50	53	32	75	50	15	40
15	25	35	50	50	29	65	50	10	48
16	8	28	25	33	32	38	17	44	50
22*	57	18	33						
23*	60	55	60						

Tabelle 5.22: Häufigkeitsverteilung der Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe in Abhängigkeit der Komplexität des Szenarios i für die Probanden der Altersgruppen alt und alt*

Tabelle 5.23 zeigt für jeden Probanden der Altersgruppen alt und alt* die Häufigkeit der Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe in Abhängigkeit der Komplexität des vorherigen Szenarios (i-1). Auch hierbei sind große intrapersonelle und interpersonelle Unterschiede zu erkennen. Lediglich vier Durchgänge (grau eingefärbt) zeigen einen Anstieg der Häufigkeit mit zunehmender Komplexität. Auch ein Zusammenhang zwischen der Komplexität des vorherigen Szenarios (i-1) und der Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe ist nicht erkennbar.

Bereiche Probanden	Durchgang 2			Durchgang 3			Durchgang 4		
	KB I	KB II	KB III	KB I	KB II	KB III	KB I	KB II	KB III
12	30	35	0	26	30	67	26	35	0
13	25	14	29	47	58	67	33	56	20
15	83	39	25	67	28	57	50	11	37
16	17	29	17	50	19	33	33	43	33
22*	13	43	50						
23*	40	47	80						

Tabelle 5.23: Häufigkeitsverteilung der Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe in Abhängigkeit der Komplexität des Szenarios i-1 für die Probanden der Altersgruppen alt und alt*

Die Probanden der Altersgruppen alt und alt* weisen bei der Erfüllung der Nebenaufgabe Probleme auf. Aufgrund der geringen Datenbasis kann für diese Altersgruppen der Zusammenhang zwischen Beanspruchung in der Hauptaufgabe und Lösung der Nebenaufgabe nicht nachgewiesen werden. Es wird jedoch vermutet, dass dieser Zusammenhang aufgrund der altersbedingt verminderten Fähigkeit, die Aufmerksamkeit zu teilen, besteht. Um belastbare Ergebnisse zu erzielen bedarf es weiterer umfangreicher Forschung.

5.6.4 Zusammenfassung

Bei der Auswertung der Daten wird deutlich, dass das Untersuchungsdesign die Lösung der Nebenaufgabe stark beeinflusst. Das bereits beschriebene „Suchverhalten“ beansprucht den Probanden zusätzlich zur subjektiv empfundenen Komplexität und wirkt sich auch auf die Lösung der Nebenaufgabe aus. Daher und aufgrund der geringen Datenbasis können keine eindeutigen Aussagen hinsichtlich dieses Zusammenhangs getroffen werden. Allerdings können aus den Problemen, die bei der Auswertung sichtbar werden, wichtige Hinweise für die Entwicklung eines Untersuchungsdesigns für spätere Studien gezogen werden.

Die Auswertung zeigt, dass insbesondere die Altersgruppen alt und alt* Probleme bei der Wahrnehmung von Verkehrszeichen sowie bei der Lösung der Nebenaufgabe aufweisen. Durch die Verminderung der Testgeschwindigkeit der Nebenaufgabe, ist die Leistung der Altersgruppe alt in beiden Aufgaben mit der Leistung der Altersgruppe mittel vergleichbar. Beide können über 96% der Verkehrszeichen wahrnehmen und lösen die Nebenaufgabe zu über 90%. Es ist anzunehmen, dass somit die altersbedingte Differenz im Apperzeptionsvermögen ausgeglichen werden konnte. Die Probanden der Altersgruppe alt* hingegen können trotz verminderter Testgeschwindigkeit „nur“ 80% der Verkehrszeichen wahrnehmen und die Nebenaufgabe auch „nur“ zu über 80% lösen. Gründe dafür sind zum Einen, dass die Verminderung der Testgeschwindigkeit die altersbedingte Differenz im Apperzeptionsvermögen nicht vollständig ausgleicht, zum Anderen kann die Wahrnehmung von Objekten durch die fortgeschrittenen psychophysischen Veränderungen weiter eingeschränkt sein.

Auch wenn der Zusammenhang zwischen Komplexität des Szenarios und Erfüllung der Nebenaufgabe für keine Altersgruppe hinreichend untersucht werden kann, wird jedoch vermutet, dass dieser zumindest in den Altersgruppen alt und alt*

vorliegt, insbesondere aufgrund der veränderten psychophysischen Merkmale (beispielsweise Sehfunktionen, Apperzeptionsvermögen, Aufmerksamkeitsteilung) im Alter. Um eindeutige Ergebnisse erzielen zu können, wird vorgeschlagen, in einer weiteren Studie, diesen Zusammenhang nochmals zu untersuchen. Dabei müssen die hierbei angesprochenen Probleme bei der Planung der Untersuchung berücksichtigt werden.

5.7 Auswertung des Blickverhaltens

5.7.1 Allgemeines

Im Folgenden wird das Blickverhalten, welches von drei Probanden im freien Feld und im Lichtlabor aufgezeichnet wurde, ausgewertet. Zunächst werden die Daten der beiden Untersuchungsbedingungen gegenübergestellt. Daraufhin wird die Übertragbarkeit der Ergebnisse des Lichtlabors auf die Realität geprüft.

Des Weiteren wird anhand der Daten von drei Probanden der Einfluss des Alters auf das Blickverhalten untersucht. Im Anschluss daran erfolgt die Auswertung der Daten eines Probanden der Altersgruppe alt (69 Jahre) hinsichtlich des Einflusses der subjektiv empfundenen Komplexität.

Für die Auswertung wird jedes Szenario über einen Zeitraum von jeweils drei Sekunden (entspricht der Präsentationszeit im Lichtlabor) ausgewertet. Als relevante Parameter werden dabei die Anzahl der Fixationen (innerhalb von drei Sekunden) und die Fixationszeiten auf verschiedene Fixationsziele betrachtet.

5.7.2 Vergleich zwischen freiem Feld und Lichtlabor

5.7.2.1 Allgemeines

Der Vergleich des Blickverhaltens im freien Feld mit dem Blickverhalten im Lichtlabor basiert auf den Daten von zehn Szenarien und drei Probanden der Altersgruppe jung. Die Fixationsziele wurden folgenden Zielkategorien zugeordnet:

- Verkehrszeichen,
- Verkehrsteilnehmer¹⁷ (andere Verkehrsteilnehmer, die überholt werden, überholen oder entgegenkommen)
- Werbung,
- Straße und
- Sonstiges (beispielsweise Bebauung wie Brücken oder Lärmschutzwände oder Bereiche, in denen keine Objekte vorhanden sind).

¹⁷ Auf die Auswertung der Kategorie Verkehrsteilnehmer muss an dieser Stelle verzichtet werden. Denn das Verkehrsaufkommen innerhalb der einzelnen Szenarien ist zwischen den drei Probanden nicht vergleichbar, da die Versuchsfahrten an verschiedenen Tagen durchgeführt wurden.

5.7.2.2 Anzahl aller Fixationen

In Bild 5-22 ist die mittlere Anzahl der Fixationen der drei Probanden im Lichtlabor und im freien Feld dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Probanden 1 und 6 im Lichtlabor im Durchschnitt eine bzw. zwei Fixationen weniger ausführen als im freien Feld. Proband 4 hingegen weist im Vergleich zum freien Feld einen geringen Anstieg der Anzahl an Fixationen auf.

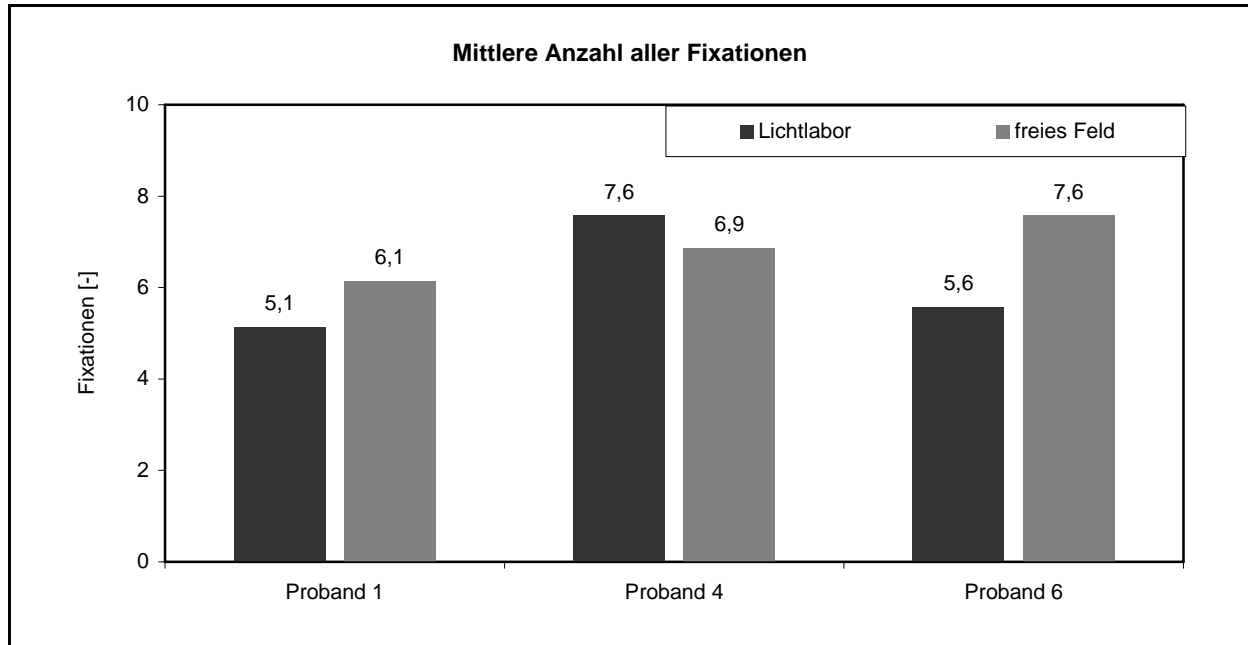


Bild 5-22: Mittlere Anzahl aller Fixationen im Lichtlabor und im freien Feld

5.7.2.3 Anzahl der Fixationen getrennt nach Fixationszielen

In Bild 5-23 ist für alle drei Probanden die mittlere Anzahl der Fixationen auf die verschiedenen Zielkategorien im freien Feld dargestellt. Es ist erkennbar, dass Proband 1 am häufigsten die Kategorien Straße, Verkehrszeichen und Werbung fixiert. Hingegen fixiert Proband 4 auffallend häufig die Kategorie Verkehrszeichen wobei er die Kategorien Werbung und Straße nur etwa halb so oft fixierte. Auch von Proband 6 wird am häufigsten die Kategorie Verkehrszeichen fixiert, die Kategorien Werbung und Straße werden weniger oft fixiert. Die Fixationsziele der Kategorie Sonstiges werden von allen drei Probanden auffallend selten fixiert.

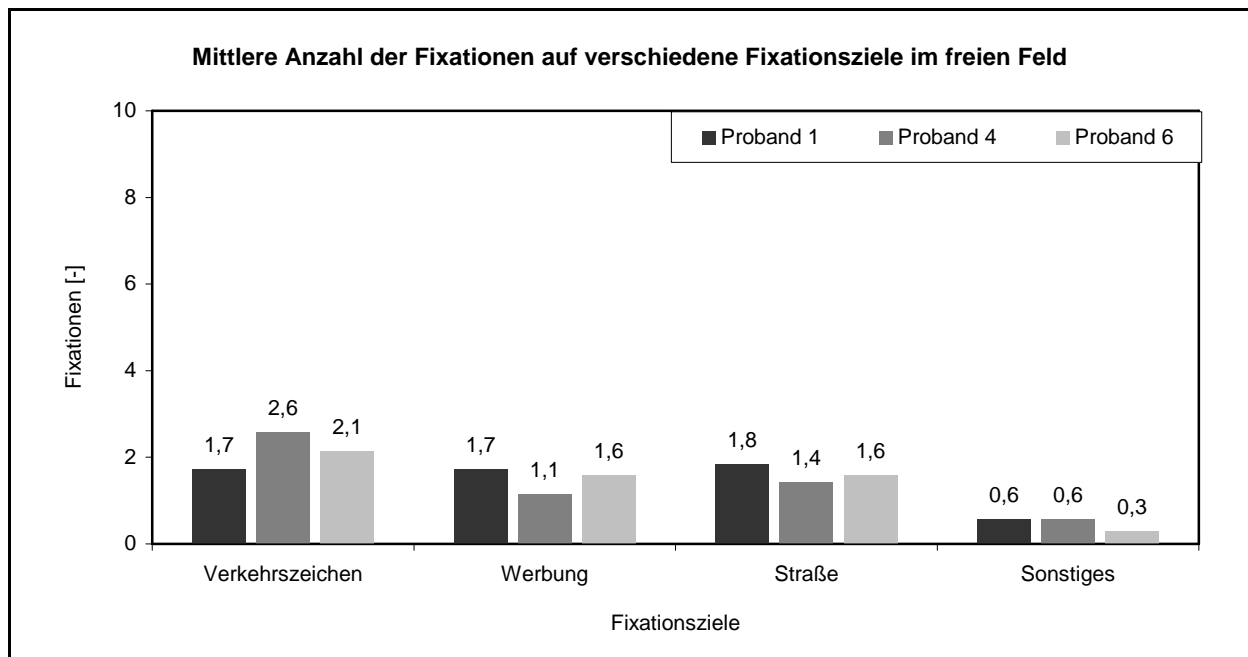


Bild 5-23: Mittlere Anzahl der Fixationen auf verschiedene Fixationsziele im freien Feld – Vergleich zwischen den Probanden

In Bild 5-24 ist für alle drei Probanden die mittlere Anzahl der Fixationen auf die verschiedenen Fixationsziele im Lichtlabor dargestellt. Es ist erkennbar, dass alle drei Probanden die Ziele der Kategorien Verkehrszeichen und Werbung am häufigsten fixieren. Hingegen werden die Ziele der anderen Kategorien weniger häufig fixiert.

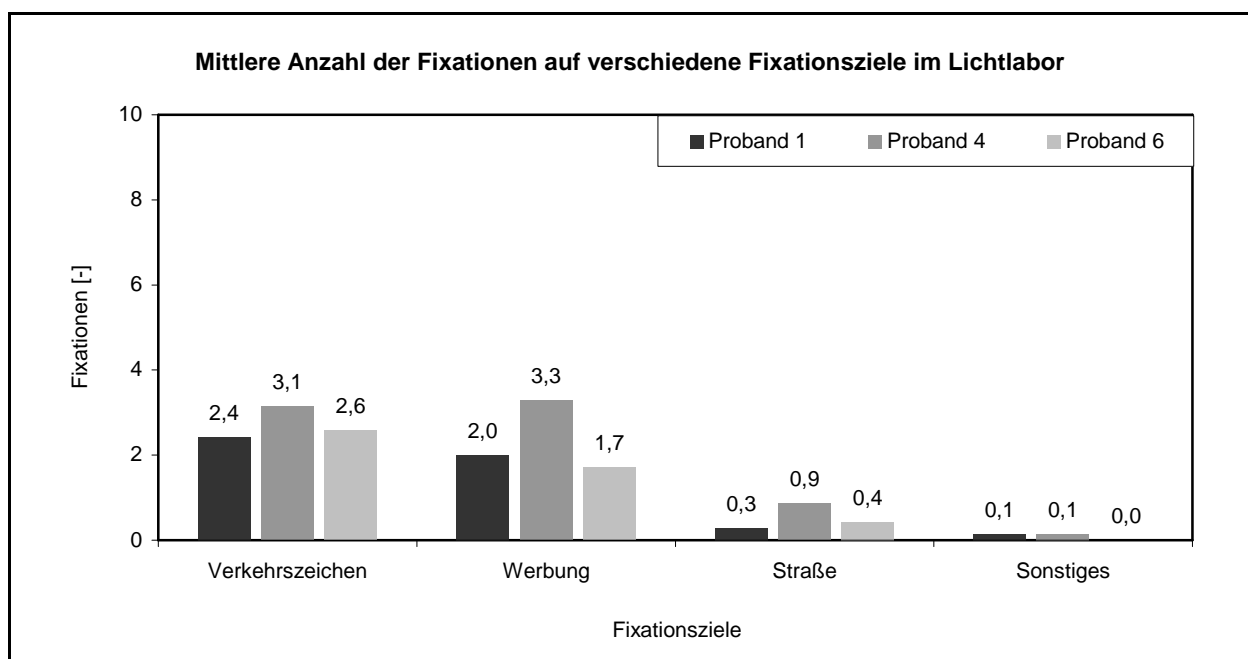


Bild 5-24: Mittlere Anzahl der Fixationen auf verschiedene Fixationsziele im Lichtlabor – Vergleich zwischen den Probanden

Das Verhältnis der mittleren Anzahl der Fixationen auf verschiedene Fixationsziele zwischen dem Lichtlabor und dem freien Feld ist für jeden Probanden in Bild 5-25 dargestellt. Jeder Probanden fixiert im Lichtlabor die Kategorien Verkehrszeichen und Werbung geringfügig häufiger als im freien Feld. Eine Ausnahme bildet Proband 4, der im Lichtlabor die Kategorie Werbung mehr als zweimal so häufig

fixiert als im freien Feld. Die Ziele der Kategorien Straße und Sonstiges werden von allen drei Probanden nur halb so oft bzw. weitaus seltener fixiert.

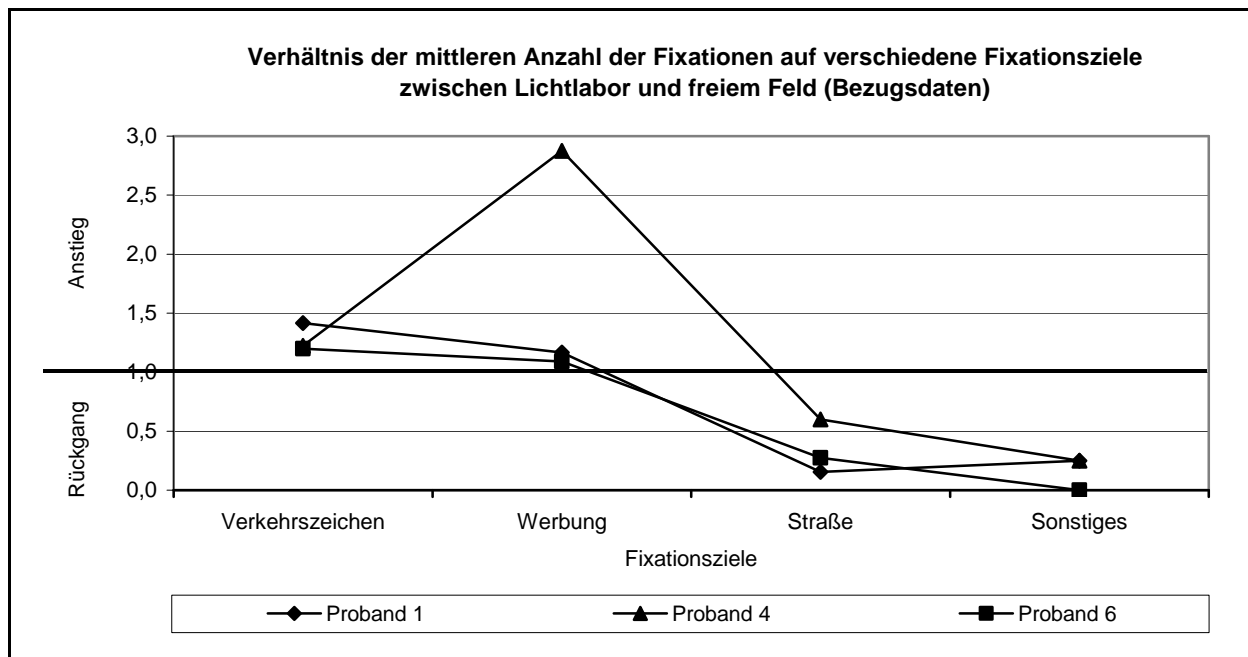


Bild 5-25: Subjektives Verhältnis der Anzahl der Fixationen zwischen Lichtlabor und freiem Feld (Bezugsdaten)

5.7.2.4 Fixationszeiten getrennt nach Fixationszielen

In Bild 5-26 sind für alle drei Probanden die mittleren Fixationszeiten der verschiedenen Fixationsziele im freien Feld dargestellt. Es ist erkennbar, dass Proband 1 am längsten die Ziele der Kategorien Werbung und Verkehrszeichen fixiert. Weniger lang fixiert Proband 1 die Ziele der Kategorien Straße und Sonstiges, wobei die Fixationszeiten für beide Kategorien annähernd gleich waren. Proband 4 hingegen zeigt ein sehr ausgeglichenes Blickverhalten. Die Ziele aller Kategorien werden annähernd gleich lang fixiert. Auch Proband 6 fixiert die Ziele der Kategorien Werbung und Straße am längsten. Die Ziele der Kategorien Verkehrszeichen und Sonstiges fixiert Proband 6 nur annähernd halb so lang wie die Ziele der Kategorie Werbung.

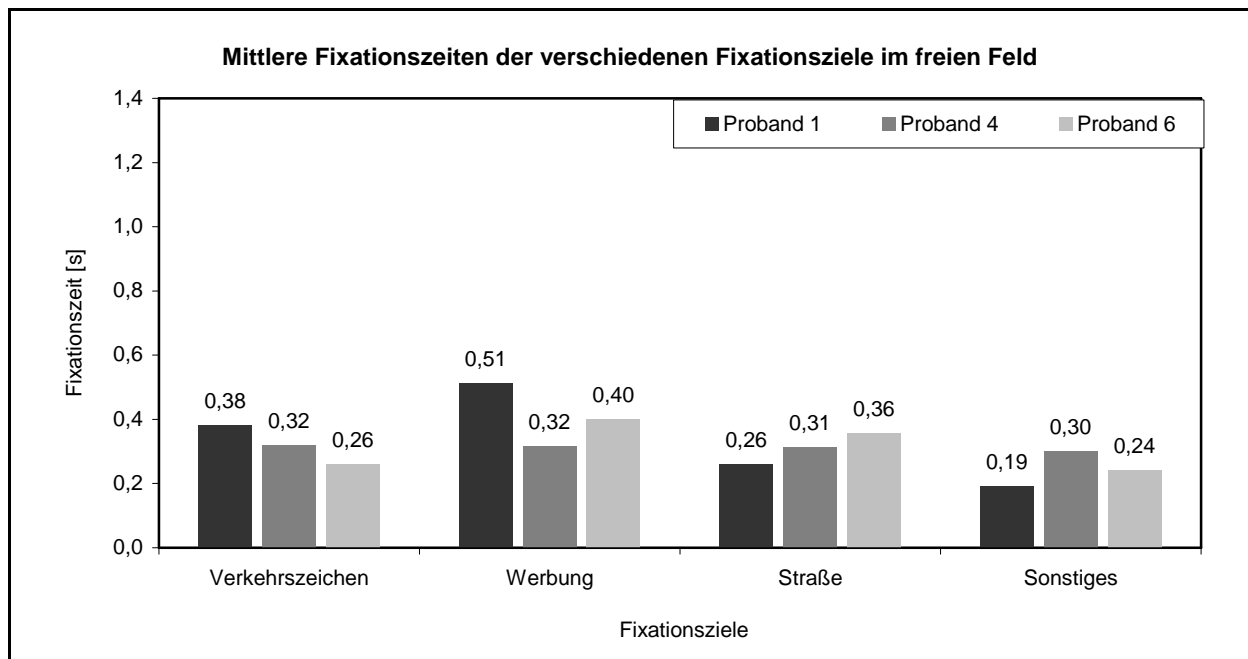


Bild 5-26: Mittlere Fixationszeiten der verschiedenen Fixationsziele im freien Feld – Vergleich zwischen den Probanden

In Bild 5-27 sind für alle drei Probanden die mittleren Fixationszeiten der verschiedenen Fixationsziele im Lichtlabor dargestellt. Es wird deutlich, dass Proband 1 am längsten die Ziele der Kategorien Werbung und Straße fixiert. Deutlich kürzer fixiert Proband 1 die Ziele der Kategorien Verkehrszeichen und Sonstiges. Proband 4 hingegen zeigt auch im Lichtlabor ein sehr ausgeglichenes Blickverhalten. Die Ziele aller Kategorien werden annähernd gleich lang fixiert. Proband 6 fixiert wie auch im freien Feld die Ziele der Kategorien Werbung und Straße am längsten. Die Ziele der Kategorie Verkehrszeichen fixiert er kürzer.

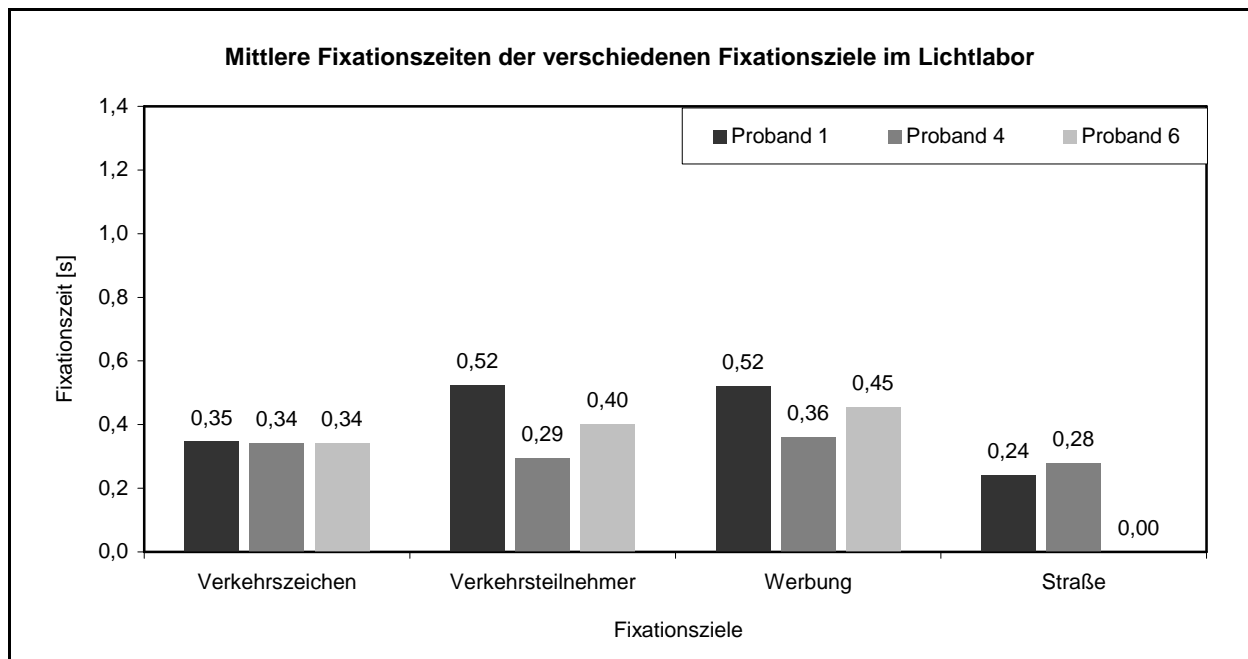


Bild 5-27: Mittlere Fixationszeiten der verschiedenen Fixationsziele im Lichtlabor – Vergleich zwischen den Probanden

Das Verhältnis der mittleren Fixationszeiten der verschiedenen Fixationsziele zwischen dem Lichtlabor und dem freien Feld ist für jeden Probanden in Bild 5-28 dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Unterschiede zwischen Lichtlabor und freiem Feld hinsichtlich der Fixationszeiten gering waren. Eine Ausnahme bildet Proband 1 für die Kategorie Straße, die er im Lichtlabor ungefähr doppelt so lang fixiert, und Proband 6 für die Kategorie Sonstiges, da er diese im Lichtlabor nicht fixiert.

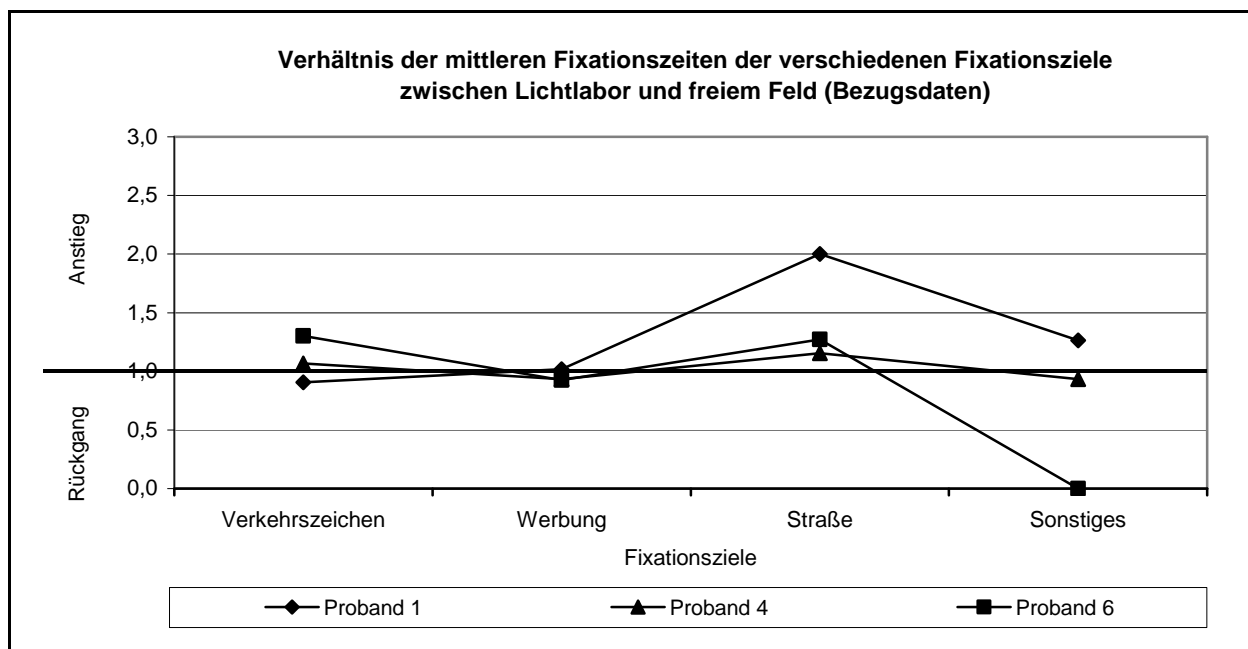


Bild 5-28: Subjektives Verhältnis der mittleren Fixationszeiten der verschiedenen Fixationsziele zwischen Lichtlabor und freiem Feld (Bezugsdaten)

5.7.2.5 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Folgende Ergebnisse können beim Vergleich zwischen freiem Feld und Lichtlabor für die Anzahl der Fixationen und die Fixationszeiten ermittelt werden:

- Sowohl im freien Feld als auch im Lichtlabor werden die Ziele der Kategorie **Verkehrszeichen** am häufigsten fixiert, wobei dieser Wert im Lichtlabor geringfügig höher lag. Die Fixationszeiten sind hingegen vergleichbar.
- Auch Ziele der Kategorie **Werbung** werden sowohl im freien Feld als auch im Lichtlabor am häufigsten fixiert. Vergleichbar zur Kategorie Verkehrszeichen ist die Anzahl der Fixationen im Lichtlabor geringfügig höher, die Fixationszeiten sind für beide Untersuchungen vergleichbar. Die Kategorie Werbung wird in beiden Untersuchungen weniger häufig dafür aber länger fixiert als die Kategorie Verkehrszeichen.
- Die Kategorie **Straße** wird im Lichtlabor weniger häufig fixiert als im freien Feld, wobei die Fixationszeiten vergleichbar sind. Die Straße wird im Lichtlabor am längsten von allen Kategorien fixiert. Die Straße besitzt insbesondere im Lichtlabor für den Fahrer nur einen sehr geringen Informationsgehalt, welches durch den Rückgang der Anzahl der Fixationen bestätigt wird. Daher stellt sich nun die Frage, weshalb die Straße im Lichtlabor so lang fixiert wird. Es wird vermutet, dass der Proband nach der Aufnahme der relevanten Informationen den Blick im Bild „ruhen“ lässt, wodurch sich diese lange Fixationszeiten ergeben.
- Die Fixationsziele der Kategorie **Sonstiges** werden sowohl im freien Feld als auch im Lichtlabor am seltensten und am kürzesten fixiert. Nur noch ein Viertel der Anzahl der Fixationen im freien Feld wird im Lichtlabor ausgeführt, dagegen sind die Fixationszeiten im freien Feld und im Lichtlabor vergleichbar.

5.7.2.6 Aussagen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse

Es wird nochmals darauf verwiesen, dass der Vergleich des Blickverhaltens auf der Basis der Daten von drei Probanden der Altersgruppe jung erfolgt, anhand einer eingeschränkten Datenmenge. Daten des Blickverhaltens für die Altersgruppen mittel und alt liegen nicht vor.

Im Lichtlabor wird im Hinblick auf die Anzahl der Fixationen insbesondere den Kategorien Verkehrszeichen und Werbung zum Nachteil der Kategorien Straße und Sonstiges mehr Bedeutung zugemessen. In Zusammenhang mit den Fixationszeiten können nur geringe Differenzen zwischen den beiden Untersuchungsbedingungen ermittelt werden. Nur unter Berücksichtigung der angeführten Unterschiede im Blickverhalten können die im Lichtlabor erzielten Ergebnisse der Altersgruppe jung in die Realität übertragen werden. In der Realität haben die Informationen der Kategorie Straße eine größere Bedeutung für den Fahrer. Dabei muss der Fahrer bei annähernd gleich bleibender Anzahl aller Fixationen auch die Ziele dieser Kategorie fixieren. Dadurch verringert sich die Anzahl der möglichen Fixationen der Kategorien Verkehrszeichen und Werbung. Sind dabei die Verkehrszeichen weniger auffällig als Werbung, besteht die Möglichkeit, dass die Verkehrszeichen weniger häufig fixiert werden. Die Folge wäre ein Verlust relevanter Informationen und somit eine höhere subjektiv empfundene Komplexität im Hinblick auf die Wahrnehmbarkeit von Verkehrszeichen. Daher ist anzunehmen, dass die jungen Probanden insbesondere die Szenarien der (Straßen-)Kategorien C und D (vgl. Kapitel 5.1.2) im realen Verkehrsgeschehen höher einstufen werden.

Für die Altersgruppen mittel und alt werden ähnliche Ergebnisse erwartet, wobei die Differenzen zwischen freiem Feld und Lichtlabor mit zunehmendem Alter ansteigen werden, denn mit zunehmendem Alter treten verschiedene psychophysische Veränderungen auf. (vgl. Kapitel 4.6.2) Es ist davon auszugehen, dass die älteren Fahrer im Vergleich zu den jüngeren insbesondere bei Fahrten in der Dunkelheit zusätzlich beansprucht werden, beispielsweise aufgrund der erhöhten Blendempfindlichkeit. Diese zusätzlichen Beanspruchungen können im Lichtlabor weitestgehend ausgeschlossen werden. Aufgrund der höheren Beanspruchung im realen Verkehrsgeschehen wird der altersbedingt eingeschränkte Prozess der Informationsaufnahme und -verarbeitung zusätzlich beeinflusst. Es können nicht mehr alle Informationen aufgenommen und verarbeitet werden. Auch hierbei wird angenommen, dass bei auffälliger Gestaltung der nicht-relevanten Informationen die relevanten Informationen „übersehen“ werden und die älteren Probanden die Szenarien im realen Verkehrsgeschehen höher einstufen.

Aufgrund der geringen Datenmenge der Altersgruppe jung sowie fehlender Daten insbesondere der Altersgruppe alt können keine allgemeingültigen Aussagen sondern nur Annahmen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse getroffen werden, die auf den Erkenntnissen einer umfangreichen Literaturstudie beruhen. (vgl. Kapitel 4) Daher werden die in dieser Arbeit erzielten Erkenntnisse hinsichtlich der subjektiv empfundenen Komplexität als Ergebnisse einer Vorstudie betrachtet. Es wird vorgeschlagen, die bekannten Untersuchungen in einer ergänzenden umfangreicheren Feldstudie durchzuführen, um den Einfluss des realen Verkehrsgeschehens berücksichtigen zu können. (vgl. Kapitel 9)

5.7.3 Der Einfluss des Alters

5.7.3.1 Allgemeines

Im Folgenden werden die Aufnahmen des Blickverhaltens, die während des zweiten Durchgangs des Untersuchungsabschnitts II aufgenommen wurden, hinsichtlich des Einflusses des Alters ausgewertet. Die Auswertung basiert auf den Daten von 16 Szenarien und drei Probanden, wobei ein Proband (1) der Altersgruppe jung, ein Proband (19) der Altersgruppe mittel und ein Proband (13) der Altersgruppe alt zugeordnet wird. Die Fixationsziele werden den folgenden Kategorien zugeordnet:

- Tracking-Aufgabe,
- Verkehrszeichen,
- Geschwindigkeitsbegrenzung,
- Werbung und
- Andere (Verkehrsteilnehmer, Straße, Sonstiges).

5.7.3.2 Anzahl aller Fixationen

Im folgenden Bild 5-29 ist die Anzahl aller Fixationen der drei Probanden dargestellt. Es ist erkennbar, dass zwischen den Altersgruppen jung und mittel keine Unterschiede existieren. Im Vergleich dazu führt der Proband der Altersgruppe alt im Mittel eine Fixation weniger aus. Dieses Ergebnis bestätigt die Erkenntnisse aus der Literaturstudie, wonach ältere Menschen mehr Zeit benötigen, um die

Informationen aufnehmen und verarbeiten zu können. Demzufolge verringert sich die Anzahl der Fixationen. (vgl. Kapitel 4.6.2)

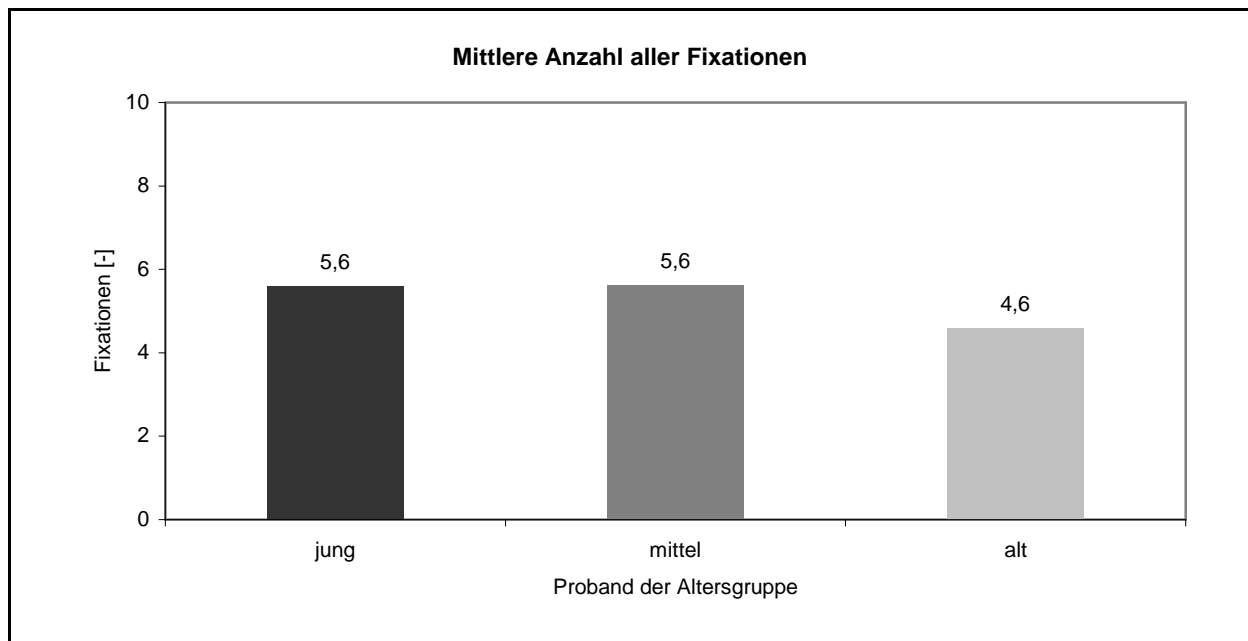


Bild 5-29: Mittlere Anzahl aller Fixationen – Vergleich zwischen den Altersgruppen

5.7.3.3 Anzahl der Fixationen getrennt nach Fixationszielen

In Bild 5-30 ist die mittlere Anzahl der Fixationen auf ausgewählte Fixationsziele getrennt nach den Altersgruppen jung und alt dargestellt. Es ist erkennbar, dass zwischen den betrachteten Fixationszielen nur geringe Unterschiede existieren. Die Ziele der Kategorie Geschwindigkeitsbeschränkung werden am häufigsten fixiert, was auf die Hauptaufgabe in diesem Untersuchungsabschnitt zurückzuführen ist.

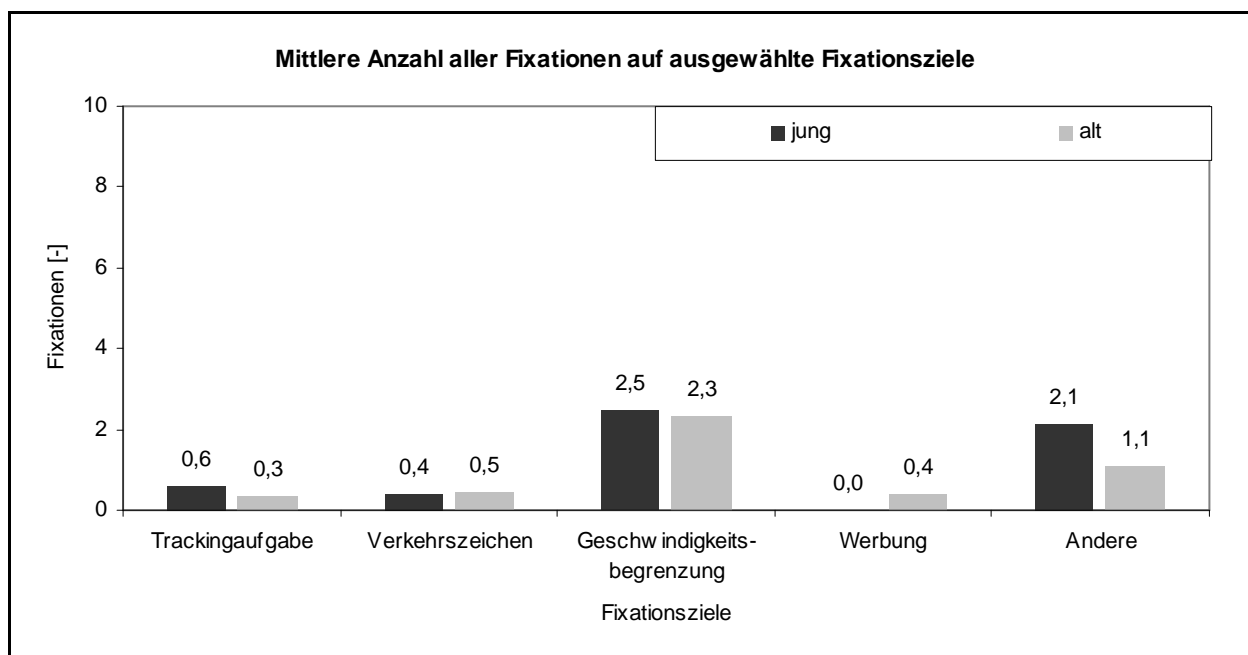


Bild 5-30: Mittlere Anzahl der Fixationen auf ausgewählte Fixationsziele – Vergleich zwischen den Altersgruppen jung und alt

Beim Vergleich der Probanden wird deutlich, dass:

- der jüngere Proband die Kategorie Tracking-Aufgabe doppelt so häufig fixiert als der ältere Proband. Dieses Ergebnis spiegelt auch die Ergebnisse, die bei der Auswertung der Lösung der Tracking-Aufgabe erzielt wurden, wider. Demnach lösen junge Probanden die Nebenaufgabe zu annähernd 100%, die älteren Probanden zu circa 92%. (vgl. Bild 5.23) Es wird angenommen, dass aufgrund einer geringeren Anzahl an Fixationen der Tracking-Aufgabe und somit fehlender Informationen darüber, die Tracking-Aufgabe nicht zu 100% gelöst werden kann.
- der ältere Proband im Gegensatz zum jüngeren Probanden Ziele der Kategorie Werbung fixiert. Das lässt vermuten, dass der ältere Proband durch diese Objekte abgelenkt wird, was auch die Ergebnisse des Untersuchungsabschnitts I widerspiegelt. (vgl. Kapitel 5.5) Demnach stufen ältere Probanden die Szenarien im Hinblick auf die Wahrnehmbarkeit von Verkehrszeichen komplexer ein.
- nur geringe Unterschiede in den Kategorien Verkehrszeichen und Geschwindigkeitsbegrenzung vorliegen.
- der jüngere Proband die Kategorie Andere doppelt so häufig fixiert als der ältere Proband, was sich auf die geringere Anzahl aller Fixationen des älteren Probanden zurückführen lässt.

5.7.3.4 Fixationszeiten getrennt nach Fixationszielen

Im folgenden Bild 5-31 sind die mittleren Fixationszeiten der ausgewählten Fixationsziele getrennt nach den Altersgruppen jung und alt dargestellt. Beim Vergleich der beiden Probanden wird deutlich, dass:

- der ältere Proband die Kategorie Tracking-Aufgabe geringfügig länger fixiert. Dieses Ergebnis ist auf die längere Zeit zurückzuführen ist, die ein älterer Mensch benötigt, um Informationen aufzunehmen und zu verarbeiten. (vgl. Kapitel 4.6.2)
- der ältere Proband sowohl die Kategorie Verkehrszeichen als auch die Kategorie Geschwindigkeitsbegrenzung weitaus länger fixiert als der jüngere Proband. Auch dieses Ergebnis ist auf den längeren Zeitbedarf älterer Menschen zurückzuführen.
- der ältere Proband die Kategorie Werbung nahezu genauso lang fixiert wie die Kategorie Andere. Der junge Probanden fixiert die Kategorie Werbung nicht. (vgl. Kapitel 5.7.3.3)
- beide Probanden die Kategorie Andere annähernd gleich lang fixieren.

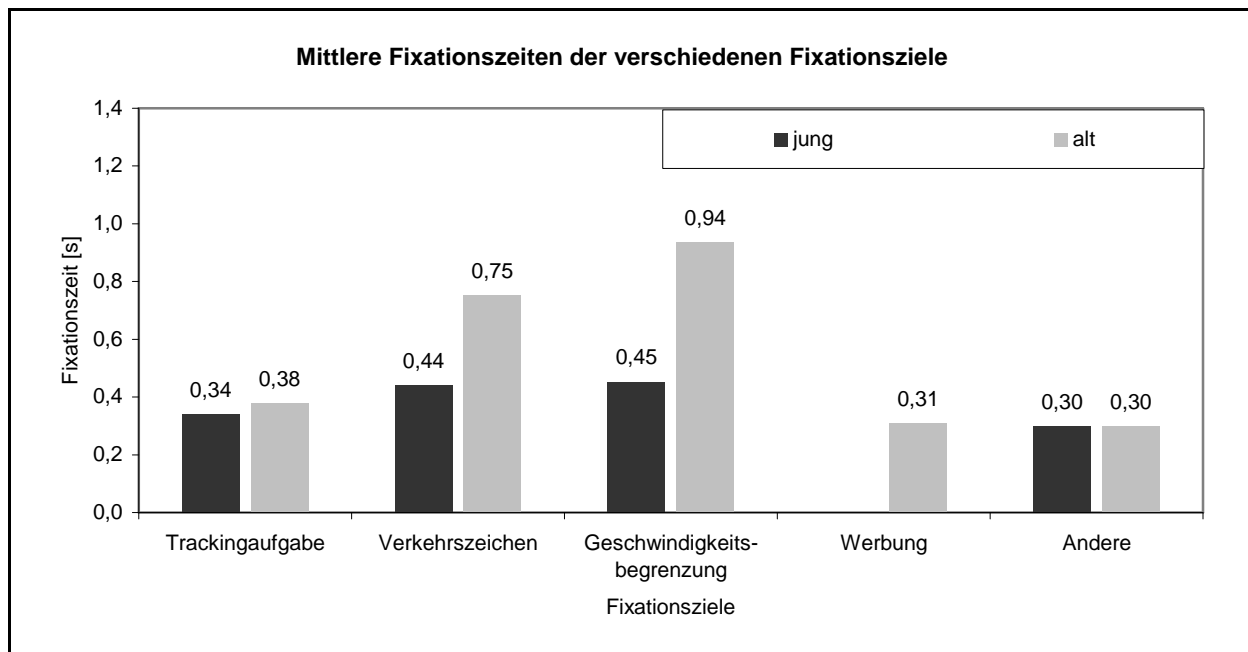


Bild 5-31: Mittlere Fixationszeiten der verschiedenen Fixationsziele – Vergleich zwischen den Altersgruppen jung und alt

5.7.4 Der Einfluss der Komplexität der Szenarien

5.7.4.1 Allgemeines

Im Folgenden werden die Aufnahmen des Blickverhaltens, die während des zweiten Durchgangs des Untersuchungsabschnitts II aufgenommen wurden, hinsichtlich des Einflusses der Komplexität ausgewertet. Als Grundlage für die Auswertung der Anzahl aller Fixationen dienen die Daten der Probanden und der Szenarien aus Kapitel 5.7.3.

Aufgrund der demographischen Prognosen und den psychophysischen Veränderungen im Alter nehmen die älteren Verkehrsteilnehmer einen besonderen Stellenwert ein. Daher beschränkt sich die Auswertungen getrennt nach den Fixationszielen (Kapitel 5.7.4.3 und 5.7.4.4) auf den Probanden 13 (69 Jahre) der Altersgruppe alt.

5.7.4.2 Anzahl aller Fixationen

Zunächst werden für jeden Probanden die Szenarien anhand der Komplexität der jeweiligen Altersgruppe, welcher der Proband angehört, in die bereits bekannten drei Komplexitätsbereiche (KB) gegliedert. (vgl. Kapitel 5.6.3.2) Im folgenden Bild 5-32 ist die mittlere Anzahl aller Fixationen der drei Probanden (Altersgruppen) getrennt nach den drei Komplexitätsbereichen dargestellt. Für den Probanden der Altersgruppe jung entfällt aufgrund der zu geringen Datenmenge im Komplexitätsbereich III (KB III) eine Bewertung.

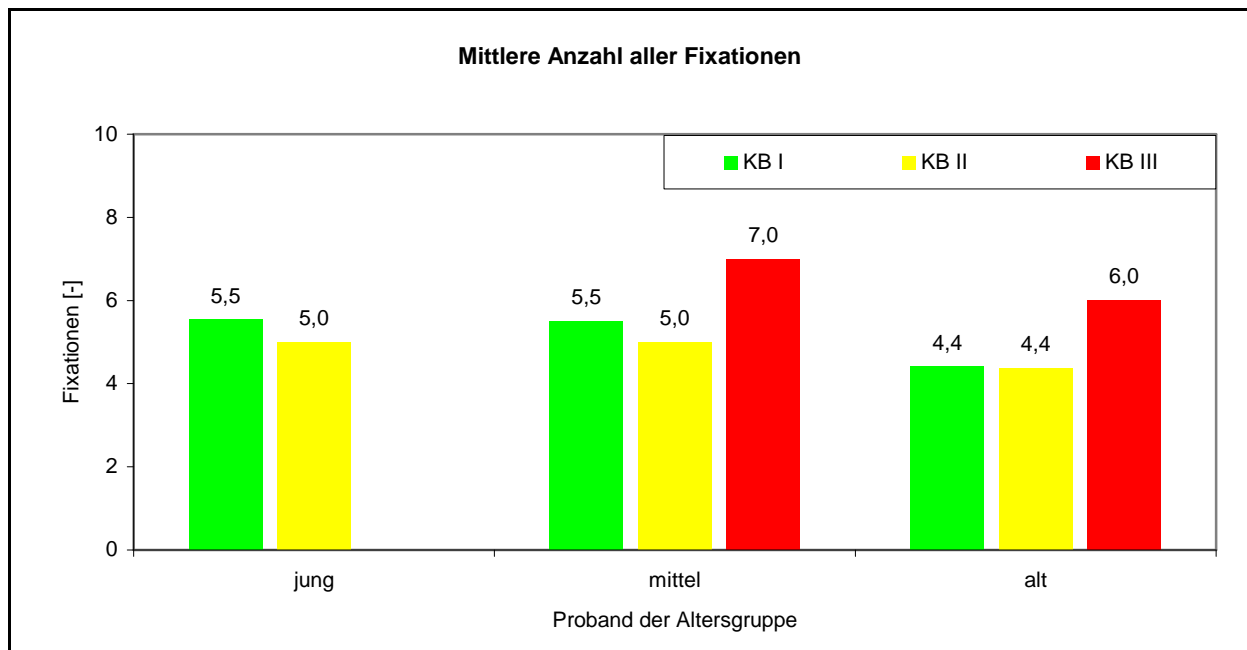


Bild 5-32: Mittlere Anzahl aller Fixationen der drei Altersgruppen getrennt nach den drei Komplexitätsbereichen

Es ist erkennbar, dass für jeden der drei Probanden kaum Unterschiede zwischen den Szenarien der Komplexitätsbereiche I und II auftreten. Zudem sind zwischen den beiden Probanden der Altersgruppen jung und mittel keine Unterschiede erkennbar, was auch die Ergebnisse der Auswertung der Komplexität widerspiegeln. (vgl. Kapitel 5.5.2) Die beiden Probanden der Altersgruppen mittel und alt führen im Komplexitätsbereich III annähernd zwei Fixationen mehr aus als in den Komplexitätsbereichen I und II, wobei der Proband der Altersgruppe alt im Vergleich zum Probanden der Altersgruppe mittel in allen drei Komplexitätsbereichen circa eine Fixation weniger ausführt. (vgl. Kapitel 5.7.3.2) Auch an dieser Stelle wird auf den erhöhten Zeitbedarf verwiesen, den ältere Menschen für die Informationsaufnahme und -verarbeitung benötigen, die Folge ist eine geringere Anzahl an Fixationen. (vgl. Kapitel 4.6.2)

5.7.4.3 Anzahl der Fixationen getrennt nach Fixationszielen

In Bild 5-33 ist die mittlere Anzahl der Fixationen auf ausgewählte Fixationsziele getrennt nach den drei Komplexitätsbereichen für den Probanden der Altersgruppe alt dargestellt. Es wird deutlich, dass mit zunehmender Komplexität die Anzahl der Fixationen der Kategorien Tracking-Aufgabe, Verkehrszeichen und Werbung ansteigt. Hingegen sinkt die Anzahl der Fixationen der Kategorie Geschwindigkeitsbegrenzung, wobei diese stets am häufigsten fixiert wird. Die Anzahl der Fixationen der Kategorie Andere bleibt in allen drei Komplexitätsbereichen annähernd gleich.

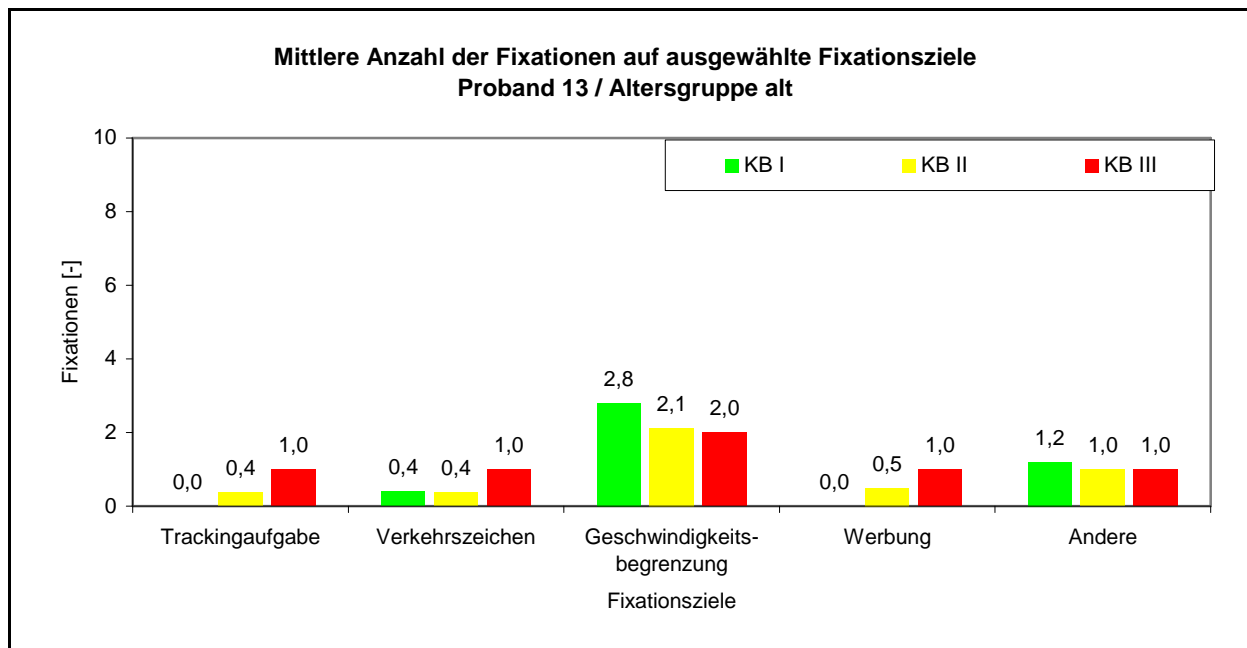


Bild 5-33: Mittlere Anzahl der Fixationen auf ausgewählte Fixationsziele eines Probanden der Altersgruppe alt – getrennt nach den drei Komplexitätsbereichen

Im Komplexitätsbereich I sind die Szenarien wenig komplex. Es wird hauptsächlich die Kategorie Geschwindigkeitsbegrenzung fixiert, weniger häufig die Kategorie Verkehrszeichen. Ziele der Kategorien Tracking-Aufgabe und Werbung werden nicht fixiert. Es ist davon auszugehen, dass in den betrachteten Szenarien nur vereinzelt Werbung enthalten ist. Des Weiteren ist anzunehmen, dass der Proband, aufgrund der geringen visuellen Beanspruchung die Tracking-Aufgabe gut über das periphere Sehen lösen kann, so dass er die Ziele dieser Kategorie nicht fixierten muss. Ein Hinweis darauf sind die Ergebnisse für Proband 13 in Tabelle 5.30, Kapitel 5.6, wonach dieser im 2. Durchgang die Nebenaufgabe zu 83% lösen konnte.

Im Vergleich dazu sind die Szenarien des Komplexitätsbereichs II bereits komplexer, denn sie enthalten eine größere Anzahl an relevanten und nicht-relevanten Informationen (zum Beispiel Werbung). Das wird insbesondere durch die gestiegene Anzahl der Fixationen der Kategorie Werbung deutlich. Zudem ist die Anzahl der Fixationen der Kategorie Geschwindigkeitsbegrenzung gesunken, die der Kategorie Verkehrszeichen bleibt gleich. Zusätzlich werden auch die Ziele der Kategorie Tracking-Aufgabe fixiert, wodurch Proband 13 die Nebenaufgabe zu 87% lösen konnte. (vgl. Kapitel 5.6) Das ist ein Hinweis darauf, dass die visuelle Beanspruchung durch das Szenario gestiegen ist. Demzufolge steigt die Aufmerksamkeit, die der Hauptaufgabe gewidmet werden muss und die Aufmerksamkeit auf die Nebenaufgabe (Tracking-Aufgabe) sinkt. Dadurch kann diese nicht allein über das periphere Sehen gelöst werden und muss zusätzlich fixiert werden.

Der Komplexitätsbereich III beschreibt sehr komplexe Szenarien mit einer Vielzahl an relevanten und nicht-relevanten Informationen. Insbesondere die Anzahl der Fixationen der Kategorien Werbung, Verkehrszeichen und Tracking-Aufgabe steigt weiter an. Obwohl die Tracking-Aufgabe im Vergleich zum Komplexitätsbereich II doppelt so häufig fixiert wird, kann diese nur zu 50% gelöst werden. (vgl. Kapitel 5.6) Das ist ein Hinweis darauf, dass die visuelle Beanspruchung durch das Szenario

weiter gestiegen ist und die Nebenaufgabe nur durch direkte Aufmerksamkeitszuwendung (Fixation) gelöst werden kann.

5.7.4.4 Fixationszeiten getrennt nach Fixationszielen

Die mittleren Fixationszeiten der ausgewählten Fixationsziele des Probanden der Altersgruppe alt ist in Bild 5-34 dargestellt. Beim Vergleich der Komplexitätsbereiche I und III wird deutlich, dass mit zunehmender Komplexität der Szenarien die Fixationszeiten in den Kategorien Verkehrszeichen und Geschwindigkeitsbegrenzung abnehmen. Die mittlere Fixationszeit der Kategorie Andere steigt hingegen an. Da sowohl die Tracking-Aufgabe als auch Werbung im Komplexitätsbereich I nicht fixiert wird (vgl. Kapitel 5.7.4.3) kann ein Zusammenhang mit zunehmender Komplexität nur zwischen den Komplexitätsbereichen II und III erkannt werden. Demnach werden diese Ziele bei ansteigender Komplexität kürzer fixiert.

Im Komplexitätsbereich I (Szenarien sind wenig komplex) werden die Ziele der Kategorie Geschwindigkeitsbegrenzung länger fixiert als die der Kategorie Verkehrszeichen. Dieses Ergebnis lässt sich auf die Hauptaufgabe in diesem Untersuchungsabschnitt zurückführen. Um diese zu lösen, müssen die geschriebenen Informationen auf dem Geschwindigkeitsbegrenzungsschild gelesen werden. Aufgrund der geringen visuellen Beanspruchung des Fahrers (vgl. Kapitel 5.7.4.3) kann er diese Informationen ausreichend lang fixieren.

Hingegen verlängern sich die Fixationszeiten der Kategorien Verkehrszeichen und Geschwindigkeitsbegrenzung im Komplexitätsbereich II (Szenarien sind komplexer), wobei die Ziele der Kategorie Geschwindigkeitsbegrenzung am längsten fixiert werden. Diese Ergebnisse machen die steigende visuelle Beanspruchung des älteren Fahrers deutlich, denn er benötigt mehr Zeit, um die Informationen aufzunehmen.

Im Komplexitätsbereich III (Szenarien sind sehr komplex) steigt aufgrund der Vielzahl an Informationen die visuelle Beanspruchung des älteren Fahrers weiter an. Die Folge ist eine Verringerung der Fixationszeiten aller Kategorien, insbesondere der Kategorie Geschwindigkeitsbegrenzung. Es wird vermutet, dass der ältere Fahrer somit versucht, die Anzahl der fixierten Informationen zu erhöhen. (vgl. Kapitel 5.7.4.3) Dabei stellt sich allerdings die Frage, in wie weit eine kürzere Fixationszeit Fehler in der Informationsaufnahme verursacht.

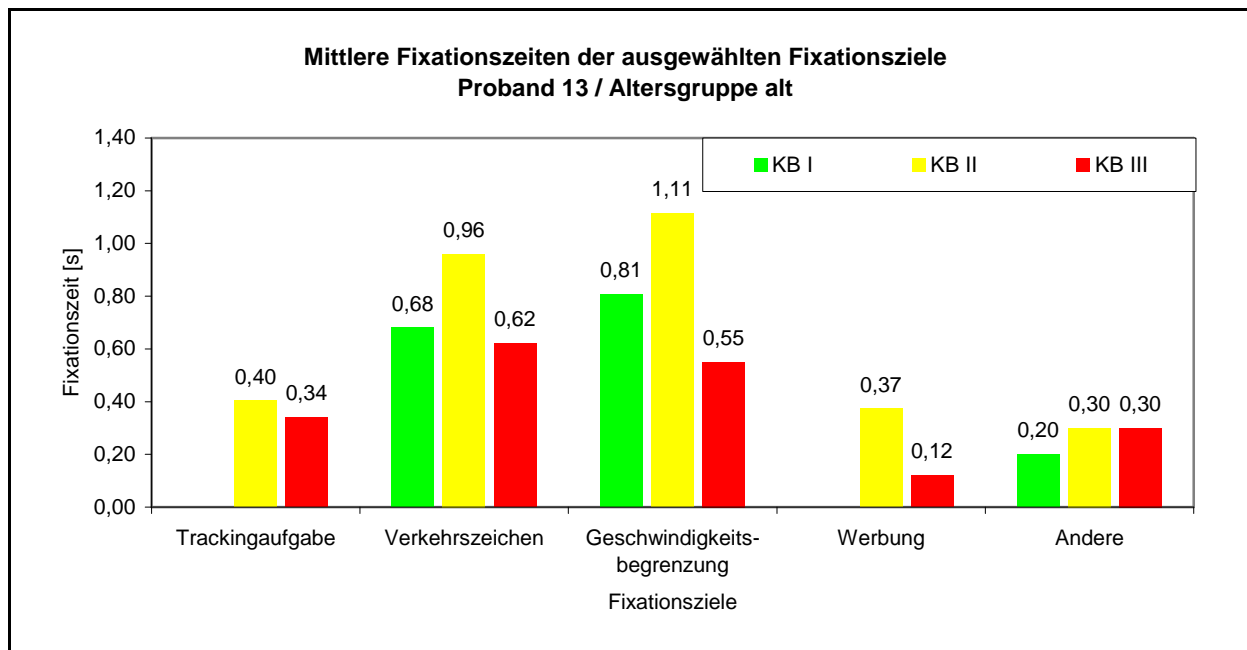


Bild 5-34: Mittlere Fixationszeiten der ausgewählten Fixationsziele eines Probanden der Altersgruppe alt – getrennt nach den drei Komplexitätsbereichen

Die Ergebnisse des Komplexitätsbereichs II bestätigen die von RAYNER (1998) (in [PANNASCH, 2003]) und COHEN (1987a) ermittelten Ergebnisse, wonach sich mit ansteigender Beanspruchung die Fixationszeiten verlängern. Im Gegensatz dazu bekräftigen die Ergebnisse des Komplexitätsbereichs III die Erkenntnissen von SCHWEIGERT (2003) und BUBB (2000), wonach sich bei steigender Beanspruchung die Fixationszeiten verkürzen. Anhand der Ergebnisse und der Angaben in der Literatur wird deutlich, dass die Beanspruchung in zwei Stufen abläuft. Stufe 1 beschreibt dabei eine Beanspruchung bis zum Maximum ($K_{SE} < 3,5$), in Stufe 2 wird die maximale Beanspruchung überschritten ($K_{SE} \geq 3,5$).

5.7.5 Zusammenfassung

Der **Vergleich des Blickverhaltens** im freien Feld mit dem Blickverhalten im Lichtlabor zeigt, dass im Lichtlabor eine geringfügig höhere Anzahl an Fixationen bzw. bis zu zwei Fixationen weniger ausgeführt werden. Zudem werden im Lichtlabor die Kategorien Verkehrszeichen und Werbung geringfügig häufiger fixiert. Dagegen werden die Ziele der Kategorien Straße und Sonstiges nur halb so oft bzw. weitaus seltener fixiert. Hinsichtlich der Fixationszeiten treten nur geringe Unterschiede zwischen Lichtlabor und freiem Feld auf. Aufgrund fehlender Daten, insbesondere für die Altersgruppe alt, können keine allgemeingültigen Aussagen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse (Untersuchungsabschnitt I) auf die Realität getroffen werden. Daher wird vorgeschlagen, die bekannten Untersuchungen in einer ergänzenden Feldstudie durchzuführen, um den Einfluss des realen Verkehrsgeschehens in allen drei Altersgruppen berücksichtigen zu können. (vgl. Kapitel 9)

Die Auswertung der Daten zum **Einfluss des Alters** macht deutlich, dass zwischen den Probanden der Altersgruppen jung und mittel keine Unterschiede hinsichtlich der Anzahl der Fixationen existieren. Zudem ist erkennbar, dass einerseits der ältere Proband weniger Fixationen ausführt als der jüngere, wobei er auch die Ziele der Kategorie Werbung fixiert. Andererseits fixiert der ältere Proband insbesondere die

relevanten Informationen (Verkehrszeichen und Geschwindigkeitsbegrenzung) sehr viel länger als der jüngere Proband. Diese Ergebnisse sind insbesondere auf die verringerte Leistungsfähigkeit des Gehirns mit zunehmendem Alter zurückzuführen.

Die Auswertung der Daten zum **Einfluss der subjektiv empfundenen Komplexität** zeigt, dass das Blickverhalten in den Komplexitätsbereichen I und II der Altersgruppe jung identisch ist, ebenso der Altersgruppen mittel und alt. Hinsichtlich der Anzahl der Fixationen sind in den Komplexitätsbereichen I und II keine Unterschiede zwischen den Altersgruppen jung und mittel vorhanden, das Blickverhalten ist vergleichbar. Die Altersgruppe alt hingegen führt in diesen Komplexitätsbereichen eine halbe (KB II) bzw. eine (KB I) Fixation weniger aus als die anderen beiden Altersgruppen. Für den Komplexitätsbereich III liegen für die Altersgruppe jung keine Daten vor, die Altersgruppe mittel führt in diesem Komplexitätsbereich im Vergleich zu den anderen beiden Komplexitätsbereichen annähernd zwei Fixationen mehr aus, vergleichbar mit der Altersgruppe alt. Die Auswertung der Daten des älteren Probanden zeigt, dass mit zunehmender Komplexität die Anzahl der Fixationen der Kategorien Tracking-Aufgabe und Werbung ansteigt, die der Kategorie Geschwindigkeitsbegrenzung sinkt. Diese Ergebnisse lassen vermuten, dass einerseits infolge gesteigerter visueller Beanspruchung die Fähigkeit, die Aufmerksamkeit zu teilen, sinkt und andererseits den nicht-relevanten Informationen aufgrund ihrer Auffälligkeit mehr Bedeutung zugemessen wird. Im Hinblick auf die Fixationszeiten wird deutlich, dass sich diese mit zunehmender Komplexität verringern. Es wird vermutet, dass der Fahrer somit versucht, die Anzahl der fixierten Informationen zu erhöhen. Dabei besteht allerdings die Gefahr, dass durch kürzere Fixationszeiten Fehlwahrnehmungen auftreten können, was zu einer Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit führen kann.

6 Entwicklung eines Modells zur Berechnung der subjektiv empfundenen Komplexität

6.1 Allgemeines

Auf der Grundlage von 13 Szenarien, die von allen Probanden hinsichtlich ihrer subjektiv empfundenen Komplexität eingestuft wurden, wird für jede Altersgruppe ein Modell zur Berechnung der subjektiv empfundenen Komplexität entwickelt. Die Szenarien spiegeln das gesamte Bewertungsspektrum der Komplexitätseinstufungen der drei Altersgruppen (jung, mittel, alt) wider. Die Szenarien werden mithilfe eines Bildbearbeitungsprogramms ausgewertet. Dazu wird zunächst das Fixierzentrum bestimmt, basierend auf den Ergebnissen von DIEM (2004). Auf mehrstreifigen Straßen bilden sich bei Dunkelheit mehrere Fixationsbereiche aus, wobei schwerpunktmäßig der rechte Rand des eigenen Fahrstreifens fixiert wird. Alle im Szenario enthaltenen Objekte werden hinsichtlich der Lage, der Fläche und der RGB-Farbwerte beschrieben. Die Definition eines Objektes richtet sich dabei nach den neun Gestaltfaktoren. (vgl. Kapitel 3.5.2 und Anhang, Kapitel A3.3.2.1) Informationen, die aufgrund ihrer Lage, ihrer Größe und ihrer lichttechnischen Eigenschaft als solitär betrachtet werden können, werden dabei als ein einzelnes Objekt behandelt. Informationen, die aufgrund ihrer Objekteigenschaften eine Gruppe bilden (beispielsweise eine Gruppe von Fahrzeugscheinwerfern) oder die linienförmig angeordnet sind (beispielsweise Straßenbeleuchtung im Verlauf der Straße), werden zusammengefasst und als ein Objekt behandelt. Die Fahrbahnmarkierungen, die in erster Linie der Führung des Fahrers innerhalb des Fahrstreifens dienen, werden in die Entwicklung des Komplexitätsmodells der vorliegenden Arbeit nicht einbezogen.

In Bild 6-1 ist das Modell zur rechnerischen Ermittlung der Komplexität dargestellt. Für jedes Objekt eines Szenarios wird zunächst die Objekteigenschaft (EO) berechnet, die von den Parametern Lage des Objektes (PF_{xy}), Größe des Objektes (GF) und lichttechnische Auffälligkeit des Objektes (AF) abhängig ist. Die Objekteigenschaft (EO) und die Kognitive Relevanz (KR) des Objektes ergeben zusammen die Objektkomplexität (OK). Die Komplexität des gesamten Szenarios (K_x) berechnet sich aus der Summe aller Objektkomplexitäten und dem Parameter NF (Anzahl aller Objekte). Die mathematischen Zusammenhänge der einzelnen Parameter, die teilweise auf Untersuchungsergebnissen und teilweise auf Annahmen basieren, sind in der folgenden Tabelle 6.1 aufgeführt.

Basierend auf einem iterativen Entwicklungsprozess der drei Komplexitätsmodelle konnten einzelne Variablen innerhalb der verschiedenen mathematischen Zusammenhänge logisch verändert werden und die Ergebnisse der drei Komplexitätsmodelle (K_x) konnten an den im Untersuchungsabschnitt I gewonnenen Ergebnisse (K_{SE}) geeicht werden.

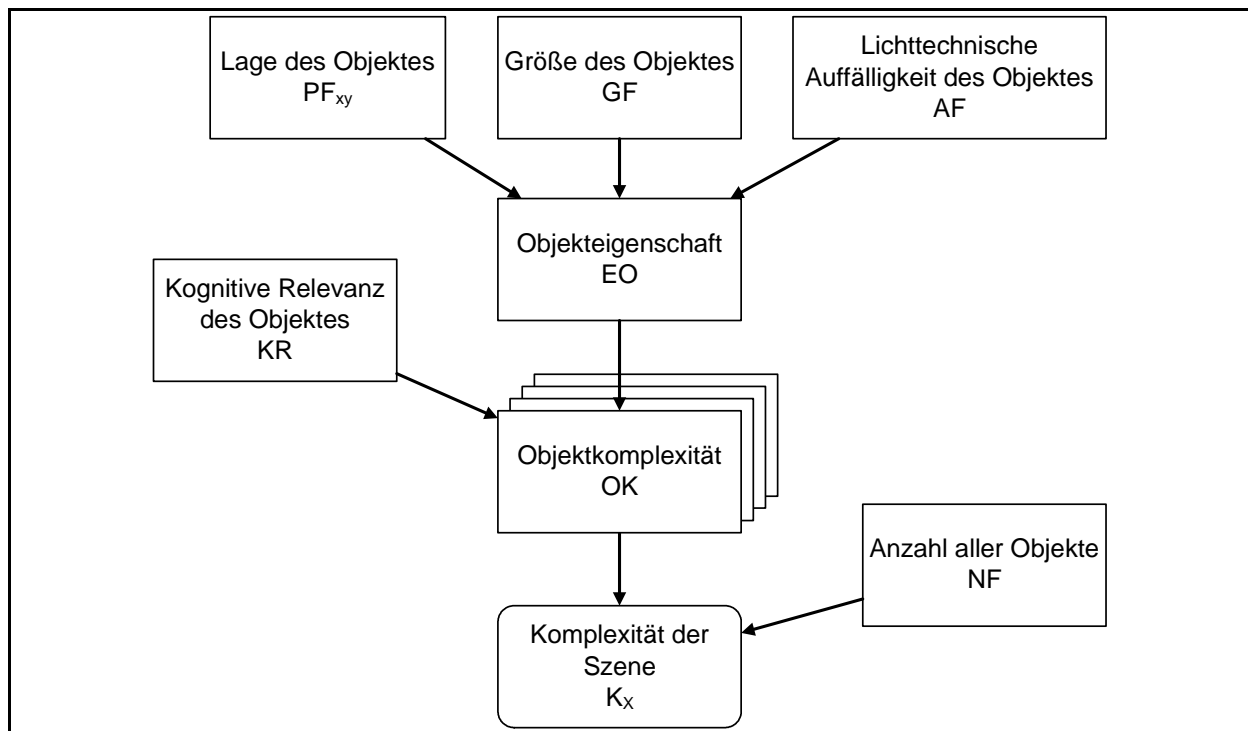


Bild 6-1: Modell zur Berechnung der Komplexität

Parameter	Mathematische Zusammenhänge	
PF _{xy}	$PF_{xy} = PF_x \cdot PF_y$ $PF_x (x < 0) = 0,9 \cdot e^{(-0,25 \cdot (x+12)^2/200)}$ $PF_x (x \geq 0) = e^{(-0,25 \cdot (x-15)^2/200)}$ $PF_y (y < 0) = e^{(-0,5 \cdot (y-12)^2/200)}$ $PF_y (y \geq 0) = e^{(-0,5 \cdot (y-20)^2/600)}$ x.....horizontaler Abstand zum Fixierzentrum y.....vertikaler Abstand zum Fixierzentrum	Formel 6-1
GF	$GF = 3,7 \cdot \log(X)/11$ (in Anlehnung an [GETZBERGER, 1976]) $X = \sqrt{(\text{Fläche des Objektes in } ^\circ 2 \cdot 60^2)}$ (in Bogenminuten)	Formel 6-2
AF	$AF = 0,005 \cdot \text{CIELAB } L^* + 0,4 \cdot \text{NCF}$ $\text{CIELAB } L^* = 116 \cdot (Y/Y_n)^{1/3} - 16$ $\text{NCF} = 10^{(0,5 \cdot \log(-0,0054 - 0,21x + 0,77y + 1,44x^2 - 2,97xy + 1,59y^2 - 2,11 \cdot (1-x-y) \cdot y^2) - \log(y))}$ (NAKANO (1986) in [SAGAWA, 2006])	Formel 6-3
EO	$EO = (0,05 \cdot PF_{xy} + 0,02 \cdot GF + 0,03 \cdot AF)$	Formel 6-4
KR	(vgl. Tabelle 6.2, Kapitel 6.6)	
OK	$OK = KR \cdot EO$	Formel 6-5
NF	$NF_{\text{jung}} = 1/8 + 0,55 \cdot \arctan(1/75 \cdot x^4)$	Formel 6-6
	$NF_{\text{mittel}} = 1/8 + 0,55 \cdot \arctan(1/75 \cdot x^{4,5})$	Formel 6-7
	$NF_{\text{alt}} = 1/8 + 0,55 \cdot \arctan(1/75 \cdot x^{5,5})$	Formel 6-8
K _x	$K_x = e^{(NF \cdot \log((\sum OK)/NF))}$	Formel 6-9

Tabelle 6.1: Mathematischen Zusammenhänge der einzelnen Modellparameter

In den folgenden Kapiteln werden zunächst die einzelnen Parameter beschrieben. Im Anschluss daran wird an einem Beispielszenario die Bestimmung der einzelnen Parameter sowie die Berechnung der Komplexität des Szenarios erläutert.

6.2 Die Lage des Objektes

Die Lage des Objektes wird durch den horizontalen und vertikalen Abstand des Objektes vom Fixierzentrum beschrieben. Der Parameter PF_{xy} ist das Produkt der Parameter PF_x und PF_y . In Bild 6-2 und Bild 6-3 ist die Relevanz eines Objektes von dessen horizontalen bzw. vertikalen Abstand zum Fixierzentrum dargestellt. Die mathematischen Zusammenhänge der Parameter basieren auf Annahmen, die im Folgenden näher erläutert werden.

Bezogen auf den horizontalen Abstand wird angenommen, dass die Objekte, die sich rechts in einem Abstand von 15° vom Fixierzentrum befinden, die größte Relevanz ($PF_x = 1,0$) aufweisen. Ist der Abstand (nach rechts) kleiner oder größer als 15° , ist die Relevanz des Objektes kleiner. Für Objekte, die sich genau im Fixierzentrum befinden, wird eine Relevanz von nur 0,75 angenommen. Für die Objekte, die links vom Fixierzentrum liegen, wird angenommen, dass deren Relevanz im Allgemeinen geringer ist. Für Objekte, die sich links in einem Abstand von 12° befinden, ergibt sich ein Maximalwert für PF_x von 0,9. Diesen Annahmen liegt zugrunde, dass bei Rechtsverkehr, die Mehrzahl der Verkehrszeichen auf der rechten Straßenseite angeordnet ist. Demnach wird vermutet, dass die Erwartungshaltung für ein Verkehrszeichen auf der rechten Straßenseite höher ist als auf der linken. Objekte, die sich auf der rechten Straßenseite befinden, haben demnach eine höhere Relevanz im Vergleich zu Objekten auf der linken Straßenseite, die sich im vergleichbaren Abstand zum Fixierzentrum befinden.

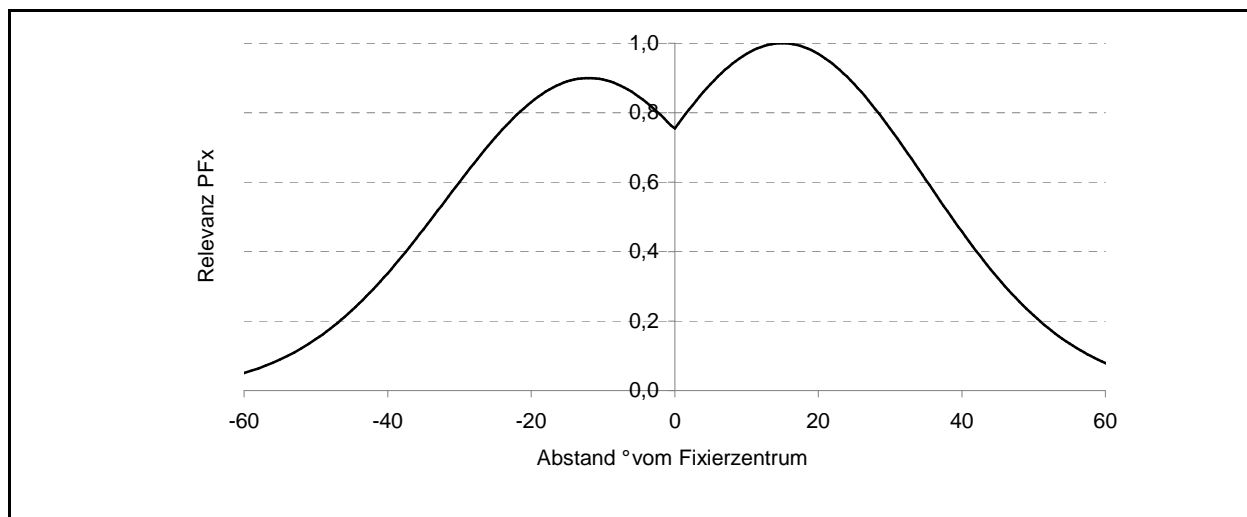


Bild 6-2: Relevanz eines Objektes in Abhängigkeit vom horizontalen Abstand

Für den vertikalen Abstand des Objektes wird angenommen, dass die Objekte, die sich unterhalb des Fixierzentrums befinden zunehmend an Relevanz verlieren. Einerseits werden in diesem Bereich keine relevanten Objekte erwartet, andererseits wird ab einer Geschwindigkeit von größer 60 km/h der Bereich direkt vor dem Fahrzeug „ausgeblendet“. (vgl. Kapitel 4.5.2) Objekte, die oberhalb des Fixierzentrums liegen, besitzen eine höhere Relevanz, insbesondere in einem Abstand von 20° . Objekte, die noch höher entfernt liegen, nehmen an Relevanz

wieder ab. Die Einschränkung nach oben ist zum Einen auf die Bauweise der Fahrzeuge zurückzuführen, zum Anderen befinden sich aufgrund der großen Fixationsentfernungen selten Informationen in diesem Bereich, so dass auch hier die Erwartungshaltung des Fahrers niedrig ist.

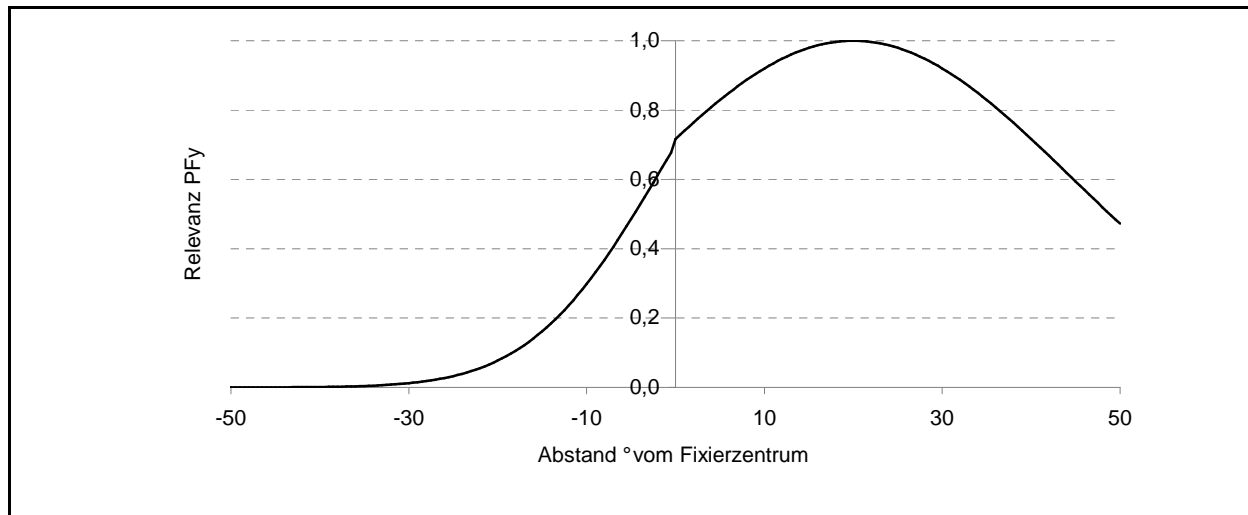


Bild 6-3: Relevanz eines Objektes in Abhängigkeit vom vertikalen Abstand

6.3 Die Größe des Objektes

Ein weiterer Einflussparameter ist die Größe des Objektes. Allgemein gilt, je größer ein Objekt, desto auffälliger ist es, wobei die Auffälligkeit nur bis zu einem bestimmten Wert ansteigt, danach nicht mehr. (vgl. ODESCALCHI (1960) in [GOTTLIEB, 1981]) Demnach wird angenommen, je größer ein Objekt desto größer ist die Relevanz dieses Objektes, wobei die Relevanz maximal den Wert 1,0 annehmen kann.

GETZBERGER (1976) untersuchte den Zusammenhang zwischen Auffälligkeit und Größe eines Objektes und formulierte anhand der Messergebnisse eine Proportionalität der Form $A \sim b \log F$ (F ist die Fläche des Testzeichens). Für eine Umfeldhelligkeit von $L_U = 0,085 \text{ cd/m}^2$ ermittelte er für b den Wert 3,7. In Bild 6-4 ist dieser Zusammenhang graphisch dargestellt, darin wird deutlich, dass mit zunehmender Objektgröße die Auffälligkeit eines Objektes und damit auch die Wahrscheinlichkeit der fovealen Abbildung steigt (linke Ordinate).

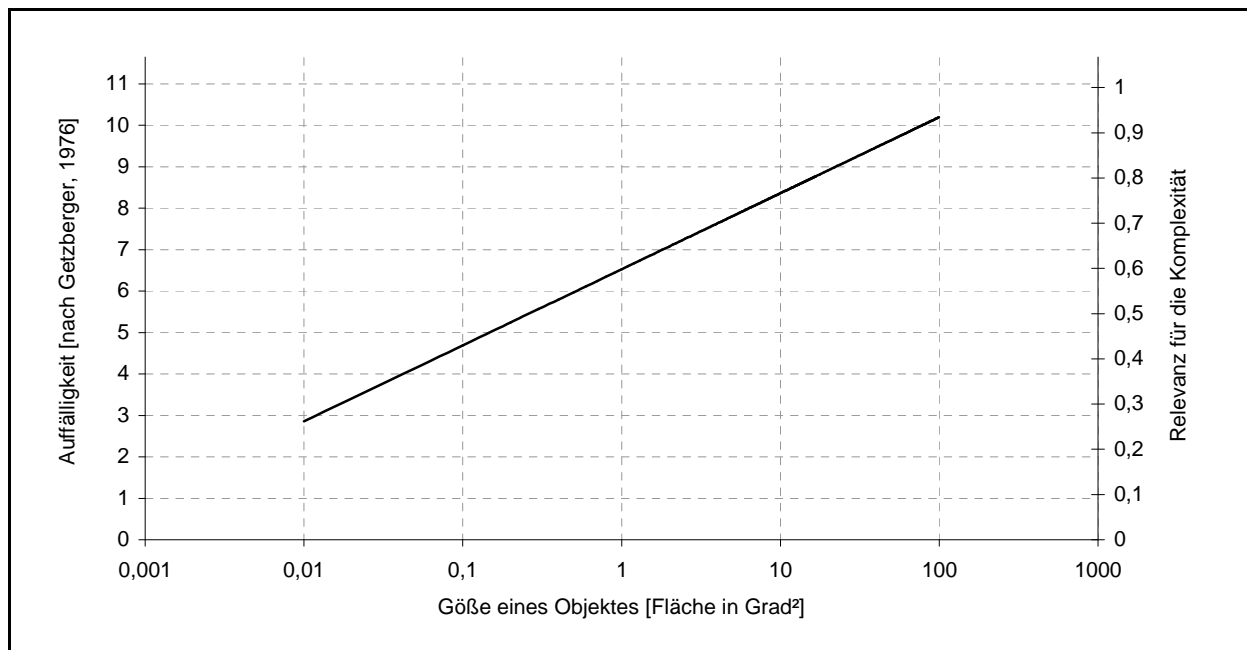


Bild 6-4: Auffälligkeit in Abhängigkeit von der Größe eines Objektes für $L_U = 0,085 \text{ cd/m}^2$ [GETZBERGER, 1976] und daraus resultierende Relevanz für die Komplexität

In Anlehnung an dieses Ergebnis wird die Relevanz für die Komplexität bestimmt (rechte Ordinate), welche maximal den Wert 1,0 annehmen kann. Daher wird der mathematische Zusammenhang nach Getzberger mit dem Faktor $1/11$ multipliziert. Es wird deutlich, dass sich die Relevanz insbesondere für große Objekte ($> 100 \text{ Grad}^2$) allmählich dem Wert 1,0 annähert.

6.4 Lichttechnische Auffälligkeit des Objektes

Die lichttechnische Auffälligkeit eines Objektes setzt sich aus zwei Parametern zusammen. Zum Einen aus dem CIELAB L^* , also der psychometrischen relativen Helligkeit des Objektes, und zum Anderen aus dem chromatischen Helligkeitsanteil nach NAKANO (1986) (in [SAGAWA, 2006]). Sowohl die CIE als auch KHANH (2004a) und KHANH (2006) stuften diese Nakano-Formel als den am meisten geeigneten Zusammenhang zur Ermittlung des chromatischen Helligkeitsanteils im mesopischen Bereich ein. Dieser berechnet sich aus den Normfarbwertanteilen aus der CIE-Normfarbtafel und beschreibt den chromatischen Anteil der Helligkeitswahrnehmung unter Beachtung der physiologischen und psychologischen Abläufe des Sehens.

In Bild 6-5 ist der Zusammenhang zwischen dem gemessenen Leuchtdichteverhältnis (Y/Y_n) und CIELAB L^* (relative Helligkeit) graphisch dargestellt. Y_n ist die Leuchtdichte vom Referenzweiß. CIELAB L^* berechnet sich aus den in den XYZ-Farbraum transformierten RGB-Werten eines Objektes und beschreibt die menschliche Wahrnehmung der relativen Helligkeit von Farben (im Vergleich zu einem Referenzweiß) mit den Werten 0% (Schwarz) bis 100% (Weiß). Es ist erkennbar, dass durch eine Erhöhung der tatsächlichen Leuchtdichte um nur 18% gegenüber dem absoluten Schwarz die psychometrische Helligkeit bereits auf 50% der psychometrischen Helligkeit des absoluten Weißpunkts ansteigt. Eine weitere Erhöhung der tatsächlichen Leuchtdichte bewirkt einen geringeren Anstieg der psychometrischen Helligkeit. Ab einem Leuchtdichteverhältnis von 90% verringert

sich der Anstieg der Kurve zunehmend und die psychometrische Helligkeit nähert sich allmählich dem Wert 100% an.

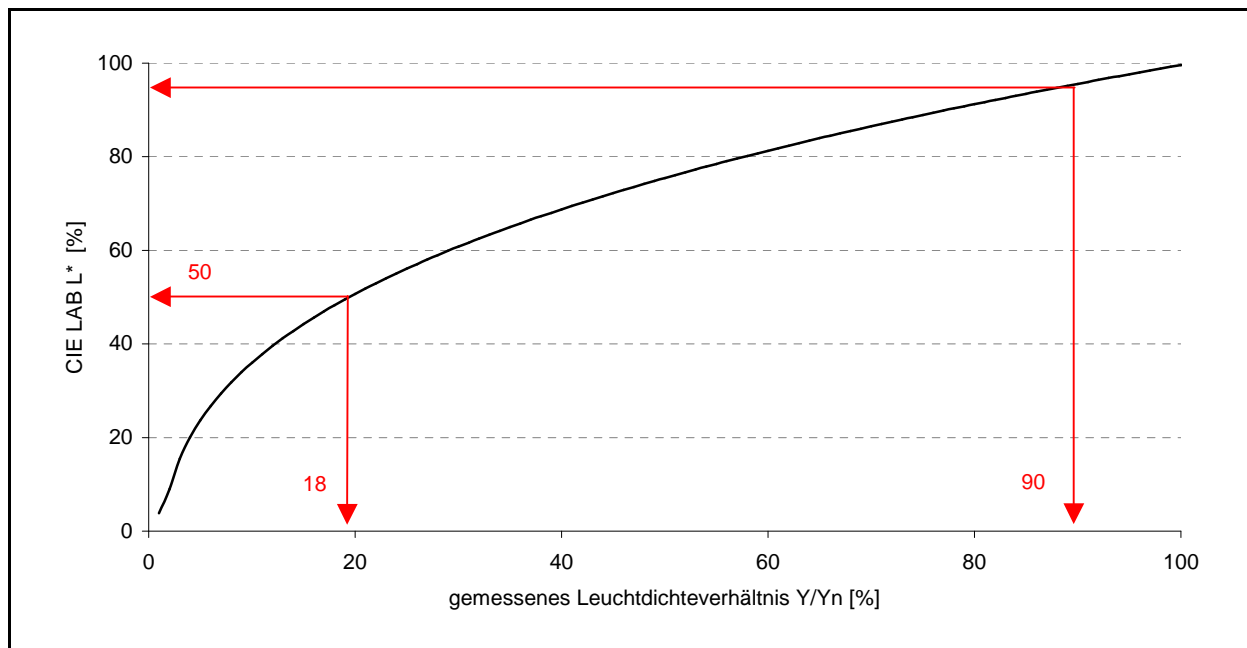


Bild 6-5: Darstellung des Zusammenhangs zwischen dem gemessenen Leuchtdichteverhältnis Y/Y_n und CIE LAB L^*

6.5 Anzahl aller Objekte

Folgendes wird angenommen: Je mehr Objekt vorhanden sind, desto größer ist die Relevanz der Anzahl der Objekte, wobei die Relevanz maximal den Wert 1,0 annehmen kann. Aufgrund der altersbedingten Veränderungen in der Informationsaufnahme und -verarbeitung wird dieser Parameter in Abhängigkeit vom Alter entwickelt. (vgl. Kapitel 4.6.2.)

Es ist bekannt, dass der Mensch in etwa drei Objekte pro Sekunde fixieren kann. Die Probanden bekamen jedes Szenario für drei Sekunden präsentiert, daraus resultieren insgesamt neun Fixationen für jedes Szenario. In Bild 6-6 ist der angenommene mathematische Zusammenhang für jede Altersgruppe dargestellt. Es ist erkennbar, dass zwischen den Altersgruppen jung und mittel nur geringe Differenzen auftreten. Junge Menschen erreichen das Maximum der Relevanz bei etwa neun Objekten, für Menschen mittleren Alters liegt das Maximum bei etwa acht Objekten. Zudem ist für beide erkennbar, dass erst ab ca. drei Objekten die Relevanz für die Komplexität ansteigt. Ältere Menschen hingegen erreichen bereits bei einer geringeren Anzahl an Objekten (etwa sechs Objekte) das Maximum der Relevanz, denn sie benötigen mehr Zeit für die Verarbeitung der Informationen und können nur eine geringere Anzahl an Informationen verarbeiten. Daher steigt die Relevanz bereits bei einer geringen Anzahl an Objekten an.

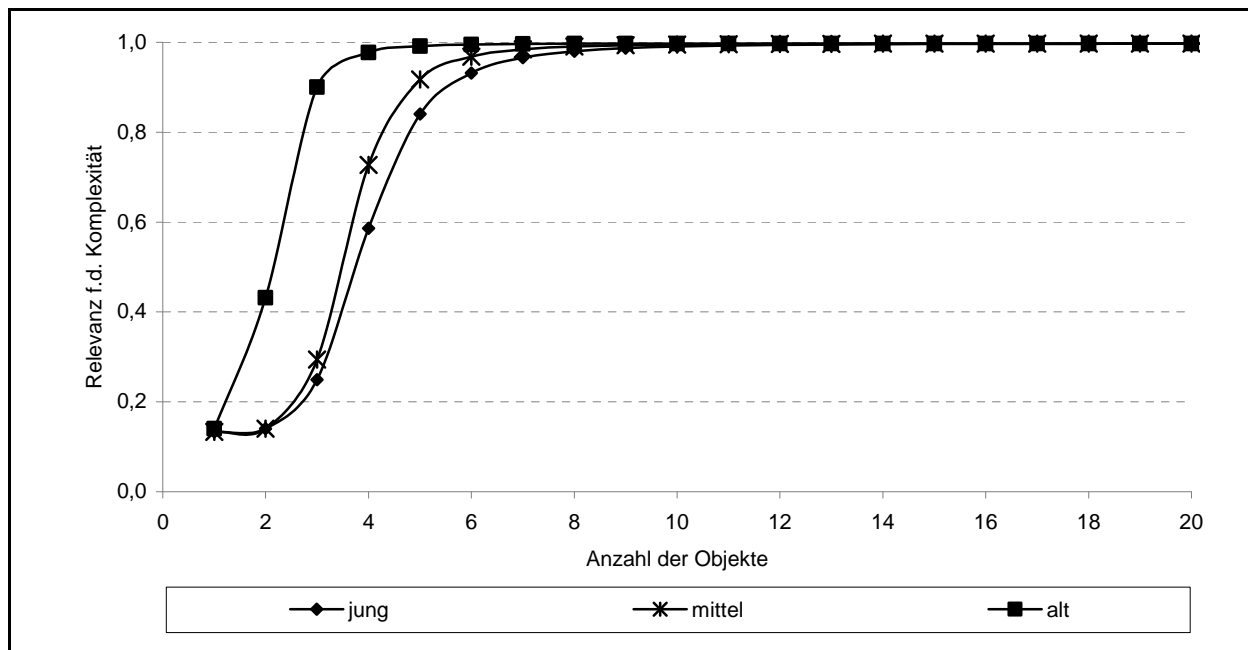


Bild 6-6: Einfluss der Objektanzahl auf die Relevanz für die Komplexität für jede Altersgruppe

6.6 Kognitive Relevanz

Die kognitive Relevanz beschreibt die Bedeutung eines Objektes aufgrund seines Informationsgehaltes. Nach SCHNEIDER ET AL. (1995) ist die Fixation eines Objektes nicht nur von der physikalischen Reizgrundlage sondern auch vom Bedeutungsgehalt abhängig. Je nach dem, in welcher Situation sich der Fahrer befindet, kann sich die Bedeutung einzelner Objekte verändern. Sind für den Fahrer Zielangaben von größter Bedeutung, wird den Wegweisern die höchste Relevanz zugeordnet. Muss der Fahrer allerdings beispielsweise tanken, wird die Relevanz selbstleuchtender Tankstellenlogos ansteigen.

In nachfolgender Tabelle 6.2 sind die kognitiven Relevanzen für verschiedene Objekte in Abhängigkeit von der Altersgruppe dargestellt. Dabei wird von einem Fahrer, der sich hauptsächlich auf die Verkehrszeichen konzentriert, ausgegangen. Zwischen den Altersgruppen jung und mittel werden keine Unterschiede angenommen, jedoch unterscheidet sich die Altersgruppe alt von diesen. Der Unterschied resultiert aus der Tatsache, dass ältere Menschen aufgrund der physiologischen Veränderungen im Auge blendempfindlicher sind. Demnach ist davon auszugehen, dass der ältere Mensch insbesondere den beleuchteten und selbstleuchtenden Objekte mehr Relevanz zuspricht, da von diesen Objekten aufgrund ihrer Eigenschaften eine „Gefahr“ im Sinne von Blendung ausgeht.

In der folgenden Formel 6-10 ist der mathematische Zusammenhang der Schleierleuchtdichte abgebildet. Diese berechnet sich aus der altersabhängigen Konstanten K , der Blendbeleuchtungsstärke E_B und dem Blendwinkel θ .

$$L_{\text{Seq}} = K \cdot E_B / \theta^2$$

[ECKERT, 1993]

Formel 6-10

mit: K ... 6,3 (jung und mittel)

K ... 10 bis 11 (alt)

E_B ... Blendbeleuchtungsstärke

Die altersabhängige Konstante K wird in die Einstufung der kognitiven Relevanz eingebunden. Demnach ist die kognitive Relevanz der älteren Menschen, insbesondere der beleuchteten bzw. selbstleuchtenden Objekte um den Faktor 1,75 (=11/6,3) höher als in den Altersgruppen jung und mittel.

Objekte	jung und mittel	alt
Wegweiser / Geschwindigkeitsbeschränkung / Zusatzinformationen	1,0	1,0
Sonstige Verkehrszeichen	0,5	0,5
Leittafel/Baken	0,3	0,3
Scheinwerfer und Rückleuchten	0,172	0,3
Lichtsignalanlagen	0,7	0,7
Straßenbeleuchtung/Beleuchtete Fenster	0,2	0,2
Angestrahlte Objekte	0,172	0,3
Selbstleuchtende Objekte/ Selbstleuchtende Werbelogos	0,286	0,5
Selbstleuchtende Werbetafeln m. geschriebenem Wort	0,401	0,7
Werbelichter	0,3	0,3
Reflektoren	0,1	0,1

Tabelle 6.2: Kognitive Relevanz für verschiedene Objekte in Abhängigkeit von der Altersgruppe

6.7 Statistische Auswertung der drei Komplexitätsmodelle

Anhand der im Vorfeld beschriebenen Analyse der Szenarien und der daraus resultierenden Komplexität K_X sowie der subjektiven Komplexitätseinstufungen K_{SE} (aus Untersuchungsabschnitt I) wird die statistische Genauigkeit jedes der drei Modelle geprüft. Die statistische Datenanalyse erfolgte mithilfe des Computerprogramms SPSS 13.0 für Windows.

In Bild 6-7 ist der Zusammenhang zwischen K_X und K_{SE} und die ermittelte Regressionsgerade für das Komplexitätsmodell der Altersgruppe alt abgebildet. Die Zusammenhänge für die Komplexitätsmodelle der Altersgruppen jung und mittel sind im Anhang, Bild A9.1 und Bild A9.2 dargestellt.

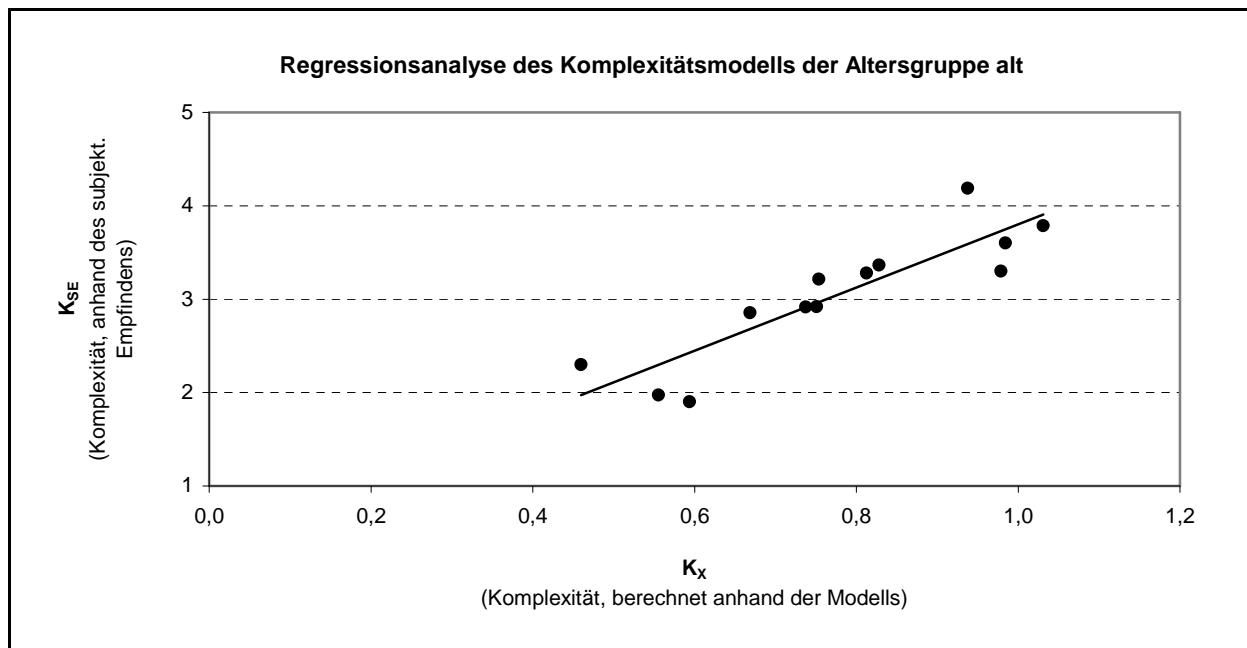


Bild 6-7: Darstellung des Zusammenhangs zwischen K_X und K_{SE} und der Regressionsgeraden des Modells der Altersgruppe alt

Für alle drei Modelle (Altersgruppen) ist erkennbar, dass mit zunehmender Größe K_{SE} (Komplexität, anhand des subjektiven Empfindens) auch die Größe K_X (Komplexität, berechnet anhand des Modells) zunimmt. Demnach lassen sich für jedes Modell (Altersgruppe) die folgenden zwei Hypothesen formulieren, die Nullhypothese (H_0) und die Alternativhypothese (H_1).

H_0 : Mit ansteigender berechneter Komplexität K_X steigt die Bewertung der subjektiv empfundene Komplexität K_{SE} nicht an.

H_1 : Mit ansteigender berechneter Komplexität K_X steigt die Bewertung der subjektiv empfundene Komplexität K_{SE} an.

Anhand der folgenden Korrelationsanalyse wird geprüft, ob die Nullhypothese beibehalten werden kann oder zugunsten der Alternativhypothese zu verwerfen ist. Für diese Analyse wird angenommen, dass die Zahlenwerte für K_X und K_{SE} intervallskaliert, aber nicht normalverteilt vorliegen. Anhand der Rangkorrelation nach Spearman wird der Zusammenhang zwischen den beiden Größen geprüft. ([BORTZ, 1985], [ZÖFEL, 2002])

In Tabelle 6.3 ist die Einstufung des Korrelationskoeffizienten zum Einen nach der allgemeinen Statistik und zum Anderen nach COHEN (1988) (in [SEDLMEIER und RENKEWITZ, 2008]) dargestellt. Diese Einstufungen haben sich in der psychologischen Forschungspraxis bewährt und dienen als Orientierungshilfe. Darin liegen die Grenzen für den Korrelationskoeffizienten niedriger, denn die psychologischen Variablen werden von einer Vielzahl anderer Variablen beeinflusst. Auch in der vorliegenden Arbeit ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse der psychophysischen Untersuchungen von vielen Variablen beeinflusst wurden. Demnach werden diese Einstufungen für die Bewertung des Korrelationskoeffizienten herangezogen.

Einstufung des Korrelationskoeffizient	
nach der allgemeinen Statistik	nach COHEN (1988)
$ r \leq 0,2 \rightarrow$ sehr geringe Korrelation	$ r \sim 0,1 \rightarrow$ schwacher Zusammenhang
$0,2 < r \leq 0,5 \rightarrow$ geringe Korrelation	$ r \sim 0,3 \rightarrow$ mittlerer Zusammenhang
$0,5 < r \leq 0,7 \rightarrow$ mittlere Korrelation	$ r \sim 0,5 \rightarrow$ starker Zusammenhang
$0,7 < r \leq 0,9 \rightarrow$ hohe Korrelation	
$0,9 < r \leq 1,0 \rightarrow$ sehr hohe Korrelation	

Tabelle 6.3: Einstufung des Korrelationskoeffizienten nach der allgemeinen Statistik [ZÖFEL, 2002] und nach COHEN (1988) (in [SEDLMEIER und RENKEWITZ, 2008])

Das Ergebnis der Korrelationsanalyse für die drei Komplexitätsmodelle ist in Tabelle 6.4 dargestellt. Für alle drei Altersgruppen ergeben sich Korrelationskoeffizienten von größer 0,875 auf dem Signifikanzniveau $p \leq 0,01$. Für jedes der drei Modelle kann nach den Einstufungen nach COHEN (1988) (in [SEDLMEIER und RENKEWITZ, 2008]) von einem starken Zusammenhang ausgegangen werden. Die Nullhypothese kann in allen drei Altersgruppen zugunsten der Alternativhypothese verworfen werden.

Korrelationsanalyse nach Spearman			
Komplexitätsmodell der Altersgruppe	jung	mittel	alt
Korrelationskoeffizient r	0,940	0,875	0,934
p ≤	0,01		
Die Nullhypothese ist zugunsten der Alternativhypothese zu verwerfen.			

Tabelle 6.4: Ergebnis der Korrelationsanalyse zwischen K_X und K_{SE} der Komplexitätsmodelle je Altersgruppe

Anhand der folgenden linearen Regressionsanalyse wird der Zusammenhang zwischen K_X und K_{SE} formelmäßig erfasst, um einen einfachen und handhabbaren mathematischen Zusammenhang zur Bestimmung der Variable K_{SE} aus der Variable K_X aufzustellen. Als Grundlage dient die in Formel 6-11 beschriebene Geradengleichung mit den Parametern b und a. Der Parameter b ist der Regressionskoeffizienten, der Parameter a ist der Ordinatenabschnitt und beschreibt den Schnittpunkt mit der y-Achse. [ZÖFEL, 2002]

$$y = b \cdot x + a$$

Formel 6-11

In Tabelle 6.5 ist das Ergebnis der Regressionsanalyse für die Komplexitätsmodelle der drei Altersgruppen dargestellt. Es sind für jedes Komplexitätsmodell das Bestimmtheitsmaß, der Regressionskoeffizient b, der Ordinatenabschnitt a sowie die Regressionsgleichung zusammengefasst. Die Regressionsanalyse ergibt für alle drei Komplexitätsmodelle (Altersgruppen) ein Bestimmtheitsmaß (R^2) von größer 0,75. Das bedeutet, dass der Anteil der Varianz der beiden Variablen K_X und K_{SE} mehr als 75% beträgt. Der Regressionskoeffizient b gibt den Anstieg der Regressionsgeraden an, der Ordinatenabschnitt a zeigt den Schnittpunkt mit der y-Achse an.

Lineare Regressionsanalyse			
Komplexitätsmodell Altersgruppe	jung	mittel	alt
Bestimmtheitsmaß R^2	0,830	0,775	0,782
Regressionskoeffizient b	5,39	6,06	3,38
Ordinatenabschnitt a	-1,89	-2,05	0,43
Regressionsgleichung	$K_{SE} = 5,39K_X - 1,89$	$K_{SE} = 6,06K_X - 2,05$	$K_{SE} = 3,38K_X + 0,43$

Tabelle 6.5: Ergebnis der lineare Regressionsanalyse der Komplexitätsmodelle je Altersgruppe

Infolge der Absicherung des Regressionskoeffizienten b (Tabelle 6.5) wird geprüft, ob sich dieser signifikant von einem Regressionskoeffizienten β ($\beta = 0$) unterscheidet. Der berechnete t -Wert wird dabei mit dem kritischen t -Wert aus der Prüftabelle verglichen. Ist der berechnete t -Wert größer als der kritische t -Wert, liegt Signifikanz auf dem entsprechenden Niveau vor. [ZÖFEL, 2002] Die ausführlichen Berechnungen für die drei Komplexitätsmodelle sind im Anhang, Kapitel A9.2 zusammengefasst. Für alle drei Komplexitätsmodelle wird die Bedingung $t_{\text{Berechnung}} > t_{\text{krit}}$ auf dem gewählten Signifikanzniveau erfüllt. Es konnte nachgewiesen werden, dass sich für alle drei Komplexitätsmodelle der Regressionskoeffizienten b sehr signifikant von Null unterscheidet.

Absicherung des Regressionskoeffizienten gegen Null			
Komplexitätsmodell der Altersgruppe	jung	mittel	alt
T_{krit} (für $p \leq 0,01$, $df = 11$)	3,106		
$t_{\text{Berechnung}}$	7,328	6,159	6,289
Bedingung: $t_{\text{Berechnung}} > t_{\text{krit}}$	erfüllt	erfüllt	erfüllt

Tabelle 6.6: Ergebnis der Absicherung des Regressionskoeffizienten gegen Null für die Komplexitätsmodelle je Altersgruppe

6.8 Erläuterungen anhand eines Beispiels

Im Folgenden wird anhand eines Beispielszenarios die Bestimmung der einzelnen Objektparameter sowie die Berechnung der Komplexität erläutert. Das Szenario liegt als digitales Bild vor und ist in Bild 6-8 dargestellt. Das Szenario zeigt einen Bundesautobahnabschnitt bei Dunkelheit. Zunächst wird nach den Ergebnissen von DIEM (2004) das Fixationszentrum festgelegt, demnach fixiert der Fahrer schwerpunktmäßig den rechten Rand des eigenen Fahrstreifens ($0^\circ, 0^\circ$). Im Szenario sind insbesondere drei Objekte sichtbar, der Wegweiser, die Leittafel und das Werbelogo. Wie bereits beschrieben, werden die Fahrbahnmarkierungen im vorliegenden Komplexitätsmodell nicht betrachtet.

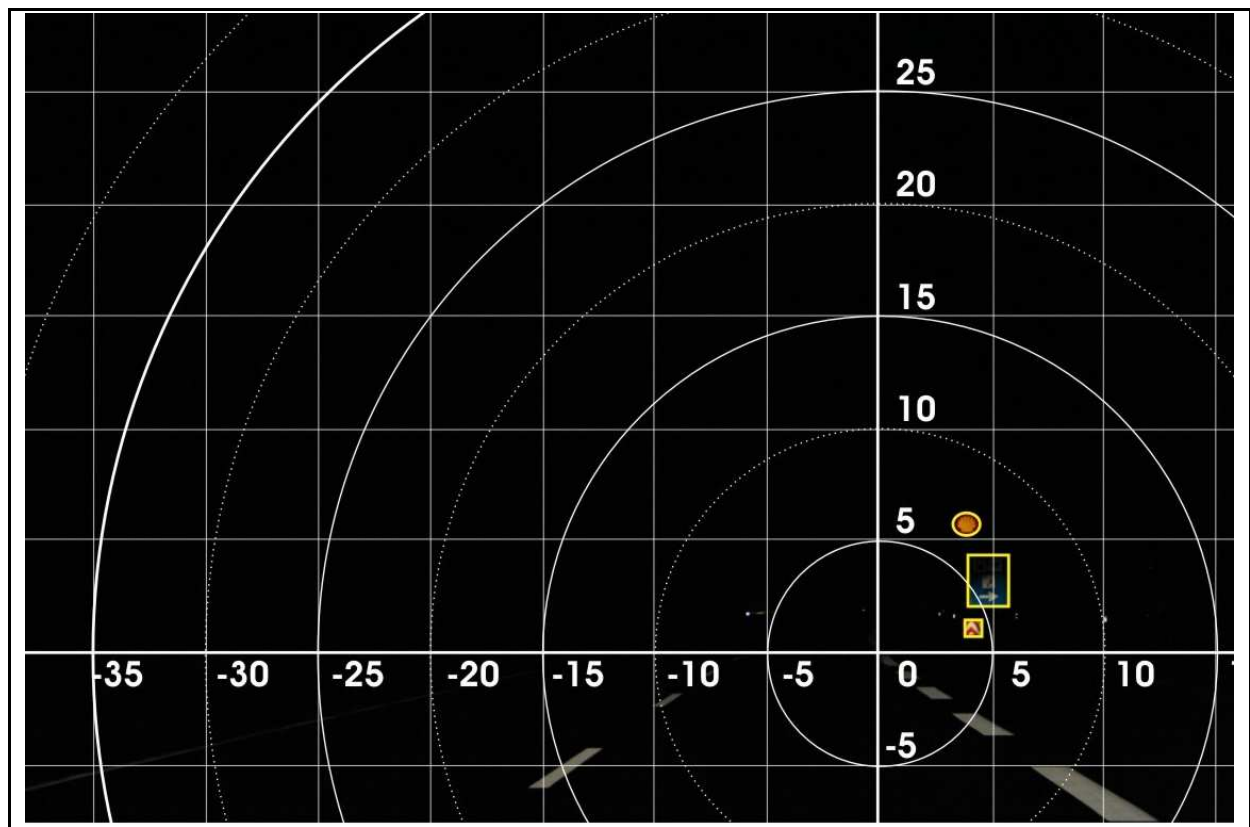


Bild 6-8: Beispielszenario zur Erläuterung des Komplexitätsmodells

Für die drei Objekte werden im digitalen Bild zunächst die Objektparameter Lage, Größe und lichttechnische Auffälligkeit bestimmt. Im Anschluss daran wird die kognitive Relevanz des Objektes festgelegt und die Objektkomplexität ermittelt. Die Summe aller Objektkomplexitäten in Kombination mit der Anzahl aller Objekte ergibt die Komplexität des gesamten Szenarios.

Zu Beginn wird der horizontale und vertikale Abstand (in Grad) des Objektmittelpunktes vom Fixierzentrum für jedes Objekt ermittelt. Anhand der beschriebenen mathematischen Zusammenhänge (vgl. Kapitel 6.2) kann dann der Objektparameter PF_{xy} berechnet werden. Die Ergebnisse für das Beispiel sind in Tabelle 6.7 dargestellt.

Objekte	Horizontaler Abstand	Vertikaler Abstand	PF_x	PF_y	PF_{xy}
Wegweiser	4,5°	3,0°	0,871	0,786	0,685
Leittafel	4,0°	1,5°	0,860	0,752	0,647
Werbelogo	3,5°	6,0°	0,848	0,850	0,720

Tabelle 6.7: Bestimmung des Objektparameters PF_{xy} für die Objekte des Beispielszenarios

In Abhängigkeit von der Größe der Objekte (in Grad²) wird der Parameter Größe des Objektes (GF) bestimmt. Mithilfe eines geeigneten Bildverarbeitungsprogramms (beispielsweise Microsoft Paint und Open Office) werden die RGB-Farbanteile jedes Objektes bestimmt, wobei der durchschnittliche Charakter der Farben gewählt wird. Diese Farbanteile werden zunächst in den XYZ-Farbraum und danach in den xy-Farbraum transformiert. Anhand der transformierten Daten werden die Größen

CIELAB L* und NCF berechnet, aus denen der Objektparameter AF resultiert. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 6.8 dargestellt.

Objekte	Größe in Grad²	GF	R/G/B	CIELAB L*	NCF	AF
Wegweiser	0,557	0,555	0/40/66	14,028	1,380	0,622
Leittafel	0,143	0,456	200/28/28	40,874	1,467	0,791
Werbelogo	0,150	0,460	188/182/0	71,742	1,053	0,780

Tabelle 6.8: Bestimmung der Objektparameter GF und AF für die Objekte des Beispielszenarios

Aus den in den vorherigen zwei Tabellen beschriebenen Objektparametern werden die Objekteigenschaften (EO) der einzelnen Objekte bestimmt. Zusammen mit der kognitiven Relevanz (KR), die nach Tabelle 6.2, Kapitel 6.6 gewählt wurde, berechnet sich die Objektkomplexität OK. In Tabelle 6.9 sind die Ergebnisse für die drei Objekte dargestellt. Aus der Summe der Objektkomplexitäten und der Anzahl der Objekte (NF) berechnet sich die Komplexität des Szenarios (K_X), die anhand der in Tabelle 6.5 beschriebenen Regressionsgleichung in die subjektiv empfundene Komplexität (K_{SE}) überführt werden kann. Die Ergebnisse für die Modelle der Altersgruppen jung und mittel sind im Anhang, Tabelle A9.4 und Tabelle A9.5 zusammengefasst.

Modell der Altersgruppe alt						
Objekte	EO	KR	OK	NF	K_X	K_{SE}
Wegweiser	0,0640	1,0	0,0640	0,900	0,452	2,0
Leittafel	0,0652	0,3	0,0196			
Werbelogo	0,0686	0,5	0,0343			

Tabelle 6.9: Bestimmung der Objekteigenschaften EO, der Objektkomplexitäten OK und der Komplexität des Szenarios K_X , Altersgruppe alt

Für dieses Beispielszenario mit insgesamt drei bewerteten Objekten ergibt sich anhand des Modells für die Altersgruppe alt eine subjektiv empfundene Komplexität von 2,0. Anhand der Modelle der Altersgruppen jung und mittel ergeben sich für das Szenario Werte von 1,6 bzw. 1,2. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Wahrnehmbarkeit der Verkehrszeichen eingeschränkt ist und somit die Verkehrssicherheit negativ beeinflusst wird, wird als sehr gering eingeschätzt. Die Fahrer aller Altersgruppen können alle relevanten Informationen aufnehmen, verarbeiten und in entsprechende Handlungsmuster umsetzen.

6.9 Zusammenfassung

Auf der Basis von 13 Szenarien, die das komplette Bewertungsspektrum der Komplexitätseinstufungen der drei Altersgruppen (jung, mittel, alt) widerspiegeln, konnte für jede der drei Altersgruppen ein Komplexitätsmodell zur rechnerischen Bestimmung der subjektiv empfundenen Komplexität entwickelt werden. Dabei wird die Komplexität von den Objektparametern Lage, Größe, lichttechnische Auffälligkeit, kognitive Relevanz und Anzahl aller Objekte bestimmt. Die mathematischen Zusammenhänge dieser Parameter basieren teilweise auf

Untersuchungsergebnissen und teilweise auf Annahmen, die auf Grundlagenwissen aufbauen. Um die mathematischen Zusammenhänge der Parameter realitätsnah abbilden zu können, wird eine gezielte Untersuchung dieser Parameter angeregt.

Die statistische Analyse der drei Modelle zeigte, dass zwischen der subjektiv empfundenen Komplexität und der berechneten Komplexität ein sehr guter Zusammenhang existiert. Basierend auf der Regressionsanalyse wird für jedes Modell ein mathematischer Zusammenhang zur rechnerischen Bestimmung der subjektiv empfundenen Komplexität ermittelt. An einem Beispielszenario wird schrittweise erläutert, wie die Objektparameter für jedes einzelne Objekt zu bestimmen sind. Im Anschluss daran werden für jedes Komplexitätsmodell zunächst die Objektkomplexitäten der einzelnen Objekte berechnet, danach wird die Komplexität des gesamten Szenarios ermittelt.

7 Einsatz und Möglichkeiten des Komplexitätsmodells

7.1 Allgemeines

Mit Hilfe des Komplexitätsmodells kann die Komplexität eines Szenarios auf der Grundlage der Eigenschaften aller vorhandenen Objekte bestimmt werden. Um die Komplexität eines Szenarios zu senken, stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Zum Einen kann der „Rückbau“ bestimmter nicht-relevanter Objekte gefordert werden, was aus Gleichbehandlungsgründen nicht immer durchsetzbar ist. Zum Anderen kann durch eine gezielte Veränderung der Objekteigenschaften die Objektkomplexität und somit auch die Komplexität des Szenarios gesenkt werden.

Basierend auf der Analyse von 17 Szenarien, die das komplette Bewertungsspektrum der Komplexitätseinstufungen der Altersgruppe alt widerspiegeln und den Parametern des Komplexitätsmodells der Altersgruppe alt wird zur Prüfung der Genehmigung nicht-relevanter Objekte eine Checkliste entwickelt, die den Behörden als adäquates Mittel bei der Entscheidungsfindung dienen kann. Zunächst werden die bei der Prüfung einzuhaltenden Grenzwerte in den Kapiteln 7.2.2, 7.2.3 und 7.2.4 erläutert.

7.2 Ermittlung der Grenzwerte

7.2.1 Grundlagen

Die Ergebnisse des Untersuchungsabschnittes I zeigen, dass, im Vergleich zu den Altersgruppen jung und mittel, die älteren Verkehrsteilnehmer die Szenarien komplexer einstufen. Aus den demographischen Prognosen wird zudem deutlich, dass die Zahl der älteren Verkehrsteilnehmer in den kommenden Jahren weiter ansteigen wird. Unter diesen Gesichtspunkten nehmen die älteren Verkehrsteilnehmer einen besonderen Stellenwert ein. Für die Entwicklung der Checkliste und für die folgenden Berechnungen der „Grenzwerte“ werden Komplexitätsbewertungen der Altersgruppe alt herangezogen. Somit stellt diese Checkliste einen Beitrag zur Berücksichtigung der altersbedingten Veränderungen bei der Gestaltung des Straßenraums dar und kann zur Erhöhung der Verkehrssicherheit beitragen.

In Bild 7-1 ist die Regressionsgerade der Altersgruppe alt, die sich anhand der Regressionsanalyse in Kapitel 6.7 ergibt, graphisch dargestellt. Sie beschreibt den mathematischen Zusammenhang zwischen den Größen K_X (berechnet anhand des Modells) und K_{SE} (aus UA I). Aufgrund der Tatsache, dass mit steigender Komplexität auch die Beanspruchung an den Fahrer steigt, werden die bereits in Kapitel 5.6.3.2 definierten drei Komplexitätsbereiche herangezogen. Der Komplexitätsbereich I (grün) reicht bis zur Komplexitätsstufe $K_{SE} < 2,5$ und wird als „guter Bereich“ bezeichnet. Für Szenarien, die diesem Bereich zuzuordnen sind, wird angenommen, dass die relevanten Objekte (Verkehrszeichen) problemlos wahrgenommen werden können. Der Komplexitätsbereich II (gelb) reicht von der Komplexitätsstufe $K_{SE} = 2,5$ bis zur Komplexitätsstufe $K_{SE} < 3,5$ und wird als „noch akzeptabler Bereich“ charakterisiert. Szenarien, die diesem Bereich zuzuordnen sind, wird unterstellt, dass sie den Fahrer dahingehend beanspruchen, dass die Wahrnehmung von relevanten Objekten geringfügig eingeschränkt ist. Der Komplexitätsbereich III (rot) beginnt ab der Komplexitätsstufe $K_{SE} = 3,5$ und wird als

„kritischer Bereich“ bezeichnet. Es wird angenommen, dass Szenarien, die diesem Bereich zuzuordnen sind, den Fahrer soweit beanspruchen, dass eine Wahrnehmung von relevanten Objekten nur eingeschränkt möglich ist. Demnach stellt insbesondere der Wert $K_{SE} = 3,5$ eine wichtige Grenze dar, deren Überschreiten vermieden werden sollte.

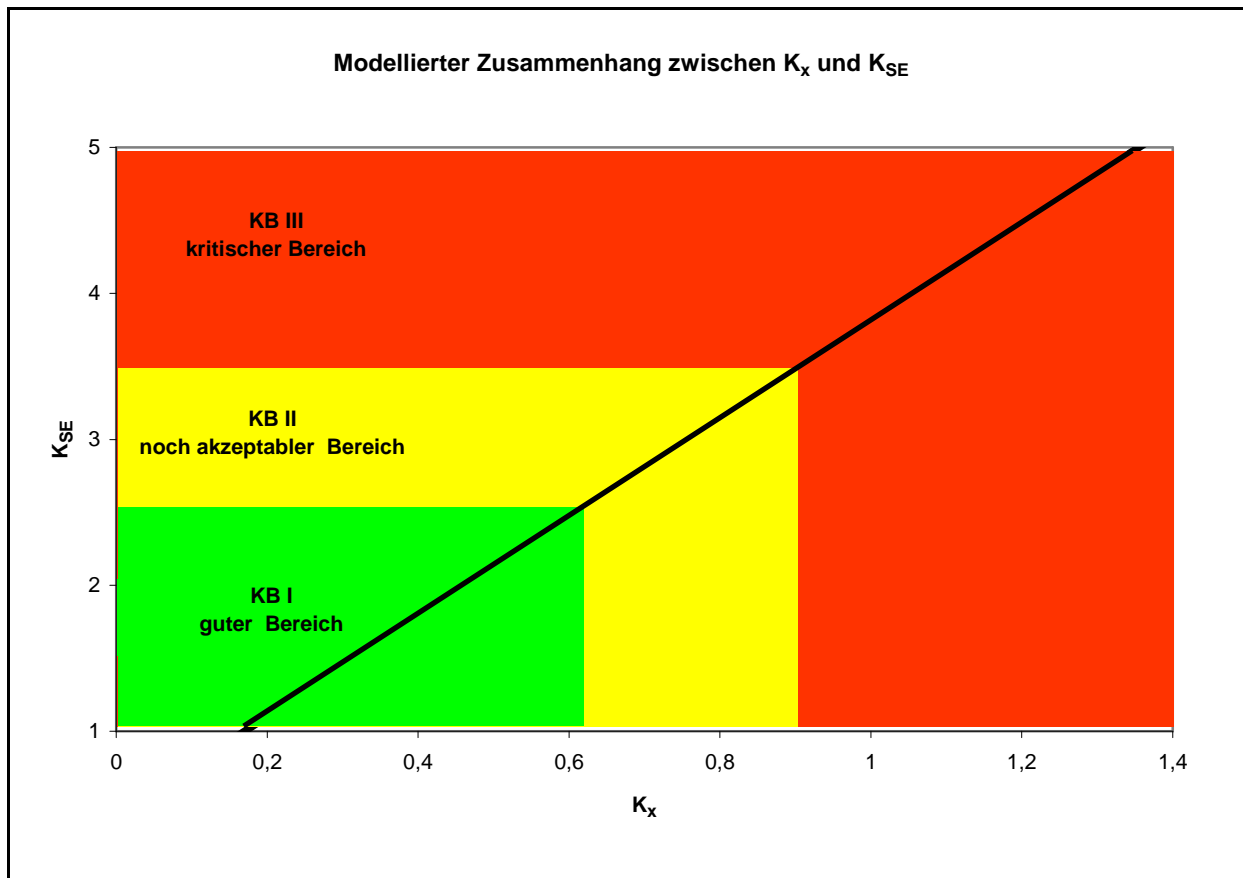


Bild 7-1: Darstellung des Zusammenhangs zwischen K_X und K_{SE} für die Altersgruppe alt und deren Einsatzbereiche

In den folgenden drei Kapiteln werden die Grenzwerte erläutert, die bei der Genehmigung nicht-relevanter Objekte eingehalten werden sollten. Die ermittelten Grenzwerte basieren auf der Analyse von 17 Szenarien. Dabei können sieben Szenarien dem Komplexitätsbereich I zugeordnet werden, sechs Szenarien dem Komplexitätsbereich II und vier Szenarien dem Komplexitätsbereich III. Die folgenden Grenzwerte werden bezogen auf den Übergang zwischen den Komplexitätsbereichen II und III (Grenze $K_{SE} = 3,5$) ermittelt.

7.2.2 Grenzwert des Ranges relevanter Objekte

Es wird angenommen, dass die Wahrnehmung von Objekten in Abhängigkeit von deren Objekteigenschaften erfolgt. Das bedeutet, dass das Objekt mit einem höheren Zahlenwert „Objekteigenschaft“ auffälliger ist und daher auch eher wahrgenommen wird, als Objekte mit einem niedrigeren Zahlenwert „Objekteigenschaft“. Diese Annahme beruht unter anderem auf der Aussage von GETZBERGER (1976), wonach die Auffälligkeit eines Objektes die Wahrscheinlichkeit seiner Fixation bestimmt.

Die Objekteigenschaft ist die gewichtete Summe der Objektparameter Lage, Größe und lichttechnische Auffälligkeit und wird nach Formel 6-3 in Kapitel 6.1 bestimmt.

Zur Ermittlung des Grenzwertes werden die Zahlenwerte „Objekteigenschaft“ aller statischen Objekte der 17 Szenarien nach den in Kapitel 6 beschriebenen mathematischen Zusammenhängen bestimmt und der Größe nach aufgelistet. Die Daten sind im Anhang, Kapitel A10.1 zusammengefasst dargestellt.

In Tabelle 7.1 sind beispielhaft für drei Szenarien die Objekteigenschaften aller statischen Objekte der Größe nach aufgelistet, dabei steht das Objekt mit dem größten Zahlenwert „Objekteigenschaft“ an erster Stelle. Die relevanten Objekte sind grau hinterlegt. Die Beispielszenarien sind im Anhang, Kapitel A10.2 dargestellt. Szenario 15 beinhaltet insgesamt sieben Objekte und gehört zum Komplexitätsbereich I. Szenario 17 gehört zum Komplexitätsbereich II und hat acht Objekte aufgelistet. Zum Komplexitätsbereich III zählt das Szenario 71, welches insgesamt elf Objekte aufweist. Im ersten Szenario (15) liegen alle Objekte innerhalb des Grenzwertes, also auf den ersten sieben Rängen. Im zweiten Szenario (17) liegen mit Ausnahme eines Wegweisers alle relevanten Objekte innerhalb der Grenze. Im dritten Szenario (71) liegen alle relevanten Objekte außerhalb des Grenzwertes. In allen drei Szenarien ist festzustellen, dass die nicht-relevanten Objekte aufgrund ihrer Objekteigenschaften die vorderen Ränge belegen, die relevanten Objekte hingegen befinden sich auf den hinteren Rängen.

Die Auswertung der 17 Szenarien ergibt Folgendes:

- In Szenarien des Komplexitätsbereiches I befinden sich alle relevanten Objekte (Verkehrszeichen) innerhalb der ersten sieben Ränge.
- In Szenarien des Komplexitätsbereiches II befindet sich die Mehrzahl der relevanten Objekte (Verkehrszeichen) innerhalb der ersten sieben Ränge.
- In Szenarien des Komplexitätsbereiches III befinden sich alle relevanten Objekte (Verkehrszeichen) außerhalb der ersten sieben Ränge.

Anhand dieser Ergebnisse wird deutlich, dass die Mehrzahl der relevanten Objekte eines Szenarios aufgrund ihrer Objekteigenschaften, innerhalb der ersten sieben Ränge liegen muss, um den Grenzwert $K_{SE} = 3,5$ nicht zu überschreiten.

Szenario	15		17		71	
Komplexitätsbereich	I		II		III	
Anzahl der Objekte	7		8		11	
EO (Rang 1)	0,082	Straßenbeleuchtungsgruppe 2	0,080	Werbung rechts	0,087	Straßenbeleuchtung rechts
EO (Rang 2)	0,081	Straßenbeleuchtungsgruppe 3	0,079	HÖFFNER-Gebäude	0,079	Tankstelle
EO (Rang 3)	0,081	Tankstelle	0,077	Wegweiser 3	0,079	ESSO-Logo
EO (Rang 4)	0,077	Straßenbeleuchtungsgruppe 1	0,075	Bake	0,078	Straßenbeleuchtung links
EO (Rang 5)	0,073	Wegweiser 1	0,072	Wegweiser 2	0,078	Straßenbeleuchtungsgruppe 1
EO (Rang 6)	0,072	Wegweiser 2	0,072	Werbung links	0,077	Straßenbeleuchtungsgruppe 2
EO (Rang 7)	0,070	Leittafel	0,068	Pfeilwegweiser	0,075	ESSO-Preisanzeige
EO (Rang 8)			0,063	Wegweiser 1	0,072	Wegweiser links
EO (Rang 9)					0,071	Wegweiser Mitte
EO (Rang 10)					0,069	Wegweiser rechts
EO (Rang 11)					0,062	Geschwindigkeitsbegrenzung

Tabelle 7.1: Der Größe nach geordnete Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte für drei Beispielszenarien

7.2.3 Grenzwert des Differenzbetrags b_{EO}

Des Weiteren wird aus der Analyse der 17 Szenarien deutlich, dass einige Szenarien (grau hinterlegt) aufgrund der geringen Anzahl an Objekten den Grenzwert des Ranges erfüllen, aber dennoch zum höheren Komplexitätsbereich II oder sogar III zugeordnet werden. (vgl. Anhang, Tabelle A10.17)

Eine mögliche Begründung liegt in der Größe der Differenz der vorkommenden Objekteigenschaften. Der Differenzbetrag b_{EO} wird bestimmt aus der Differenz zwischen dem Zahlenwert „Objekteigenschaft“ des Objektes auf dem ersten Rang und dem Zahlenwert „Objekteigenschaft“ des Objektes auf dem letzten Rang. (vgl. Formel 7-1) Demnach entspricht der Differenzbetrag b_{EO} der Spannweite der Objekteigenschaften.

$$b_{EO} = EO_{(Rang\ 1)} - EO_{(Rang\ n)} \quad \text{Formel 7-1}$$

Im Anhang, Tabelle A10.18 sind die ermittelten Differenzbeträge für alle Szenarien mit weniger als acht Objekten dargestellt.

Anhand von zwei Beispielen (Szenarien 79 und 87) soll dieser Zusammenhang näher erläutert werden. Die beiden Szenarien sind im Anhang, Kapitel A10.2 dargestellt. In

Tabelle 7.2 sind die einzelnen Objekte und die zugehörigen Objekteigenschaften der Größe nach aufgelistet. Beide Szenarien beinhalten jeweils fünf statische Objekte. Der Grenzwert des Ranges wird somit in beiden Szenarien eingehalten. Trotzdem wurden die Szenarien unterschiedlichen Komplexitätsbereichen zugeordnet, Szenario 87 dem Komplexitätsbereich II und Szenario 79 dem Komplexitätsbereich I. Es ist erkennbar, dass der Differenzbetrag b_{EO} für das Szenario 79 kleiner ist als für das Szenario 87.

Auch in Tabelle A10.18 (Anhang) ist erkennbar, dass insbesondere bei Differenzbeträgen größer 0,020 die Szenarien dem höheren Komplexitätsbereich II oder sogar dem Komplexitätsbereich III angehören. Daher wird angenommen, dass bei zu großen Differenzbeträgen die Auffälligkeit der einzelnen Objekte stark variiert und demnach insbesondere die Objekte auf den letzten Rängen eher unauffällig erscheinen. Des Weiteren ist erkennbar, dass insbesondere die Wegweiser immer auf den Rängen drei und höher aufgelistet sind. Rang 1 und Rang 2 belegen aufgrund ihrer Objekteigenschaften hauptsächlich nicht-relevante Objekte. Es wird angenommen, dass daraufhin die Beanspruchung des Fahrers im Hinblick auf die Wahrnehmbarkeit von Verkehrszeichen ansteigt und somit auch die subjektiv empfundene Komplexität. Daher wird vorgeschlagen, neben dem in Kapitel 7.2.2 beschriebenen Grenzwert des Ranges auch den Grenzwert des Differenzbetrages zu prüfen. Aus der Analyse der entsprechenden neun Szenarien ergibt sich als Grenzwert des Differenzbetrags b_{EO} ein Wert von 0,02.

Es stellt sich nun die Frage, in wie weit die Beanspruchung des Fahrers und damit auch das Komplexitätsempfinden beeinflusst werden, wenn die relevanten Objekte aufgrund ihrer Objekteigenschaften die vorderen Ränge belegen. Es wird angenommen, dass die Beanspruchung des Fahrers im Hinblick auf die Wahrnehmbarkeit von Verkehrszeichen abnimmt. Diese Frage kann jedoch aus den zur Verfügung stehenden Daten nicht beantwortet werden. Daher wird vorgeschlagen, diesen Sachverhalt in einem zukünftigen Forschungsprojekt zu untersuchen und die Checkliste dahingehend zu erweitern.

Szenario	79		87	
Komplexitätsbereich	I		II	
Anzahl der Objekte	5		5	
EO (Rang 1)	0,080	Werbung rechts	0,087	ARAL-Logo rechts
EO (Rang 2)	0,078	100m Tafel	0,087	Tankstelle
EO (Rang 3)	0,075	Werbelicht	0,075	Leittafel
EO (Rang 4)	0,070	Blauer Wegweiser	0,067	ARAL-Logo links
EO (Rang 5)	0,062	Weißer Wegweiser	0,062	Wegweiser
b_{EO}	0,018		0,025	

Tabelle 7.2: Differenzbeträge b_{EO} für die betrachteten Szenarien 79 und 87

7.2.4 Grenzwert des „Rauschens“

Die begrenzte Verarbeitungskapazität des Menschen wird bereits mit dem Grenzwert des Ranges berücksichtigt. Liegt die Mehrzahl der relevanten Objekte innerhalb der Grenze, kann hinsichtlich ihrer Wahrnehmung von einer geringen Beanspruchung des Fahrers ausgegangen werden. Dennoch wird es als sinnvoll erachtet, die Anzahl der Objekte zu beschränken. Es wird vermutet, dass der Mensch in einem Szenario mit einer sehr großen Anzahl an Objekten zu Unsicherheit neigt, denn er kann den überwiegenden Teil der Objekte, die aufgrund ihrer Objekteigenschaften auf den hinteren Rängen (beispielsweise Rang 10 und höher) liegen, nicht erkennen. Es ist weiterhin vorstellbar, dass dabei nicht nur die Anzahl der Objekte, sondern auch deren Verteilung eine Rolle spielt. Also ob diese Objekte über das gesamte Szenario verstreut liegen, oder ob sie gruppiert im Szenario platziert sind. Dieser Zusammenhang zwischen Anzahl und Verteilung der Objekte wird als Grenzwert des „Rauschens“ bezeichnet. Anhand der zur Verfügung stehenden Daten, konnte dieser Zusammenhang nicht geprüft werden.

Da dieser Zusammenhang anhand der vorliegenden Daten nicht geprüft werden kann, wird ein Forschungsprojekt zur Klärung dieses Sachverhalts vorgeschlagen. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse soll der Grenzwert des „Rauschens“ formuliert und die Checkliste erweitert werden.

7.2.5 Zusammenfassung

Die Komplexität eines Szenarios wird zum großen Teil von den Objekteigenschaften der einzelnen Objekte bestimmt. Es werden die drei Komplexitätsbereiche beschrieben, wobei insbesondere der Komplexitätsbereich III vermieden werden sollte. Aus den Daten von 17 Szenarien werden die Grenzwerte hinsichtlich des Ranges der relevanten Objekte und des Differenzbetrages der Objekteigenschaften bestimmt. Des Weiteren wird vermutet, dass auch die Anzahl der Objekte und deren Verteilung einen Einfluss auf die Komplexität eines Szenarios nimmt. Dieser Grenzwert des „Rauschens“ kann anhand der vorliegenden Datenbasis nicht ermittelt werden. In einem zukünftigen Forschungsprojekt soll dieser Zusammenhang untersucht werden.

Der Grenzwert des Ranges relevanter Objekte basiert auf der Auflistung der Objekteigenschaften aller Objekte (der Größe nach). In Szenarien des Komplexitätsbereiches I befinden sich alle relevanten Objekte (Verkehrszeichen) innerhalb der ersten sieben Ränge. In Szenarien des Komplexitätsbereiches II befindet sich die Mehrzahl der relevanten Objekte innerhalb der ersten sieben Ränge. Darauf basierend wird vorgeschlagen, dass die Mehrzahl der relevanten Objekte aufgrund ihrer Objekteigenschaften innerhalb der ersten sieben Ränge liegen muss, um den Grenzwert $K_{SE} = 3,5$ nicht zu überschreiten.

Außerdem ist in Szenarien mit einer geringen Anzahl an Objekten ($n \leq 7$) zu beobachten, dass trotz Einhaltung des Grenzwertes des Ranges, einige Szenarien dem höheren Komplexitätsbereich II oder sogar dem Komplexitätsbereich III zugeordnet werden. Eine mögliche Begründung liegt in der Größe des Differenzbetrages der vorkommenden Objekteigenschaften, dem so genannten b_{EO} -Wert. Dieser berechnet sich aus der Differenz der Objekteigenschaften des ersten und des letzten, maximal siebenten Objektes. Aus der Analyse der Daten geht hervor, dass

ein b_{EO} -Wert von größer 0,02 zu einer Erhöhung der subjektiv empfundenen Komplexität führen kann. Dieser Wert wird als kritischer Wert für den Differenzbetrag b_{EO} vorgeschlagen, gilt allerdings nur in den Fällen, in denen die relevanten Objekte aufgrund ihrer Objekteigenschaften auf den hinteren Rängen (ab Rang 4) aufgelistet sind. Die Frage, wie stark das Szenario den Fahrer beansprucht und er demnach die Komplexität einschätzt, wenn die relevanten Objekte die vorderen Ränge belegen, kann aus den zur Verfügung stehenden Daten nicht beantwortet werden. In einem zukünftigen Forschungsprojekt soll dieser Zusammenhang untersucht werden.

Die beschriebenen Grenzwerte der Checkliste basieren zum Einen auf Ergebnissen aus dem Lichtlabor, zum Anderen auf den mathematischen Zusammenhängen des Basismodells, die derzeit teilweise noch auf Annahmen beruhen. Daher kann die erarbeitete Checkliste derzeit nur begrenzt eingesetzt werden. Für die Entwicklung einer erweiterten Checkliste wird empfohlen, die Grenzwerte anhand der Ergebnisse von Untersuchungen im realen Straßenraum zu prüfen und zu überarbeiten.

7.3 Vorläufige Checkliste für das Genehmigungsverfahren

In Bild 7-2 ist die vorläufige Checkliste zum Prüfvorgang im Genehmigungsverfahren dargestellt, dessen Empfehlung bei der Entscheidungsfindung herangezogen werden kann.

Der Prüfer muss zunächst das Szenario analysieren, er muss für alle statischen Objekte den Positionsparameter PF_{xy} , den Größenparameter GF und den lichttechnischen Auffälligkeitsparameter AF bestimmen. Aus diesen drei Parametern ergibt sich nach Formel 6-4 die Objekteigenschaft des Objektes. Zudem muss auch von dem zur Genehmigung vorliegenden nicht-relevanten Objekt die Objekteigenschaft bestimmt werden. Gegebenenfalls sind auch weitere nicht-relevante Objekte aufzunehmen, die bei der Genehmigung des ersten aus Gleichbehandlungsgründen zu genehmigen wären, beispielsweise in der Nähe von Industriegebieten. Danach werden die Objekteigenschaften aller statischen Objekte sowie der/des zu genehmigenden Objekte/s der Größe nach geordnet aufgelistet, das Objekt mit dem höchsten Zahlenwert auf dem ersten Rang.

Befinden sich maximal sieben Objekte im Szenario, ist zu prüfen, ob der Differenzbetrag der Objekteigenschaften zwischen dem ersten und dem letzten bzw. siebenten Objekt kleiner als der kritische Differenzbetrag ist. (vgl. Kapitel 7.2.3) Wird dieser Grenzwert eingehalten, kann die Genehmigung des nicht-relevanten Objektes empfohlen werden. Wird dieser Grenzwert nicht eingehalten und befinden sich die relevanten Objekte auf den hinteren Rängen, so empfiehlt es sich, die Objekteigenschaften der im Szenario enthaltenen Objekte gezielt zu verändern. Das bedeutet, es ist zu prüfen, in wie weit die Objekteigenschaften des Objektes auf dem ersten Rang oder auf dem letzten Rang verändert werden können. Die Objekteigenschaft ist eine Summe aus drei Parametern, somit ist entweder eine sinnvolle Veränderung der Position, der Größe oder der lichttechnischen Auffälligkeit oder eine Kombination aus diesen drei Parametern möglich. Eine Veränderungen bei regelkonform aufgestellten und dimensionierten Verkehrszeichen wird sich dabei eher auf die lichttechnische Auffälligkeit beschränken, beispielsweise Folientyp oder Beleuchtung. Bei nicht-relevanten Objekten hingegen, können alle drei Objektparameter variiert werden. Da diese insbesondere durch die lichttechnische

Auffälligkeit einen hohen Wert für die Objekteigenschaft besitzen, wird empfohlen, die lichttechnische Auffälligkeit der nicht-relevanten Objekte zu minimieren. Kann trotz Veränderung der Objekteigenschaften der Grenzwert des Differenzbetrages nicht eingehalten werden, kann eine Genehmigung der/des nicht-relevanten Objekte/s nicht empfohlen werden. (Für den Fall, dass sich die relevanten Objekte aufgrund ihrer Eigenschaften auf den vorderen Rängen befinden, liegen derzeit noch keine Erkenntnisse vor, so dass an dieser Stelle keine Empfehlung ausgesprochen werden kann.)

Befinden sich mehr als sieben Objekte im Szenario, ist zu prüfen, ob sich die Mehrzahl der relevanten Objekte (Verkehrszeichen) innerhalb der ersten sieben Ränge befindet. (vgl. Kapitel 7.2.2) Ist diese Bedingung erfüllt, ist weiterhin zu prüfen, ob der Differenzbetrag der Objekteigenschaften zwischen dem ersten und dem siebenten Objekt kleiner als der kritische Differenzbetrag ist. Wird dieser Grenzwert eingehalten, ist zu prüfen, ob der Grenzwert des „Rauschens“ überschritten wird oder nicht. (vgl. Kapitel 7.2.4) Zu diesem Grenzwert liegen derzeit noch keine Erkenntnisse vor. (Wird dieser nicht überschritten, kann die Genehmigung des nicht-relevanten Objektes empfohlen werden. Wird dieser überschritten, kann die Genehmigung nicht oder nur unter Auflagen empfohlen werden.) Befindet sich die Mehrzahl der relevanten Objekte (Verkehrszeichen) nicht innerhalb der ersten sieben Ränge, wird empfohlen, die Objekteigenschaften der im Szenario enthaltenen Objekte gezielt zu verändern. (vgl. vorheriger Absatz) Wird trotz Veränderung der Objekte die Bedingung nicht erfüllt, kann die Genehmigung des nicht-relevanten Objektes nicht empfohlen werden.

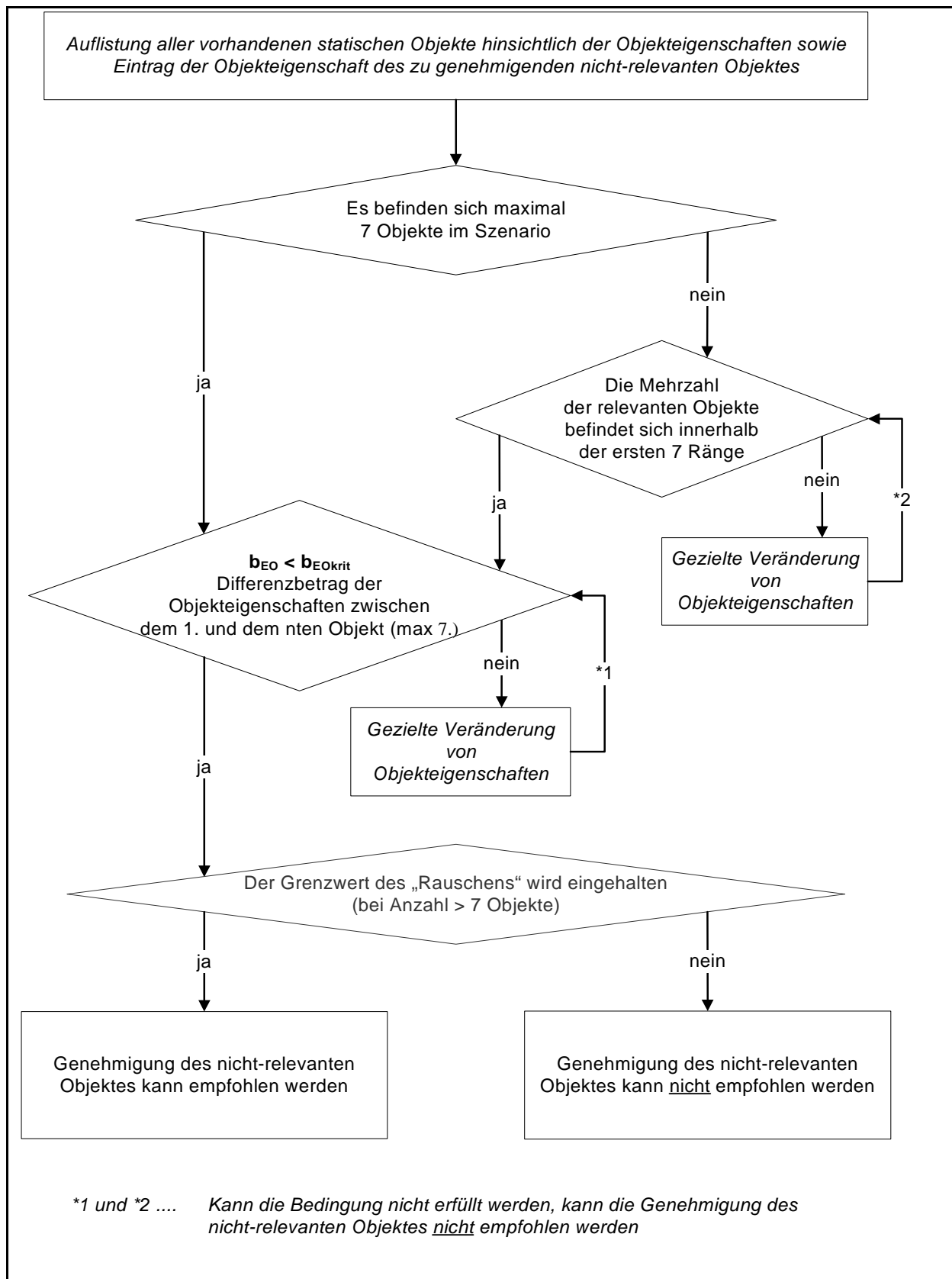


Bild 7-2: Vorläufige Checkliste zum Prüfvorgang im Genehmigungsverfahren

8 Zusammenfassung

Im Straßenraum befindet sich eine Vielzahl visueller Informationen, die alle auf den Fahrer einströmen. Dazu gehören neben den relevanten Informationen, wie beispielsweise den Verkehrszeichen, auch nicht-relevante Informationen, wie beispielsweise Werbetafeln. Die Kapazität der Informationsaufnahme und -verarbeitung des Menschen ist hingegen begrenzt. Um sich im Straßenraum jedoch richtig orientieren und entsprechend verhalten zu können, muss der Fahrer insbesondere die relevanten Informationen aufnehmen und verarbeiten sowie in entsprechende Handlungsmuster umsetzen. Es wird vermutet, dass zwischen den Verkehrszeichen und den Objekten des Straßenumfeldes eine Konkurrenz hinsichtlich ihrer Auffälligkeit besteht. GETZBERGER (1976) definiert die Auffälligkeit eines Objektes mit der Größe der Chance, dass dieses Objekt im Bereich der Fovea abgebildet und identifiziert wird. Ist die Auffälligkeit eines peripheren Objektes hoch genug, steigt die Wahrscheinlichkeit, mit der dieses Objekt im Bereich der Fovea Centralis abgebildet also fixiert wird. Dabei wird die Auffälligkeit eines Objektes nicht nur von dessen Eigenschaften, sondern auch von dessen Umgebung bestimmt. Ein Objekt, welches in einem eintönigen Umfeld auffällig erscheint, kann in einem sehr komplexen Umfeld unauffällig sein. Die relevanten Informationen werden zugunsten der nicht-relevanten Informationen möglicherweise zu spät oder nicht wahrgenommen. Die Folge ist ein Verlust wichtiger Informationen, wodurch beispielsweise die Orientierung des Fahrers eingeschränkt wird. Das daraus resultierende Verhalten des Fahrers kann sich negativ auf die Verkehrssicherheit auswirken.

Der Einfluss von Werbung auf die Verkehrssicherheit wird bereits seit den 1960er Jahren untersucht. Anfänglich wurden Unfalldaten ausgewertet, wodurch kein direkter Einfluss nachgewiesen werden konnte. Später folgten experimentelle Untersuchungen, in denen zunächst Reaktionszeiten gemessen wurden, seit den 2000er Jahren wurde auch das Blickverhalten untersucht. Insbesondere anhand der Blickverhaltensuntersuchungen konnte der Einfluss der Werbung mehrheitlich nachgewiesen werden.

Der visuelle Wahrnehmungsvorgang ist ein gesteuerter Prozess und kann in die Stufen: Sehen - Wahrnehmen - Erkennen gegliedert werden. Auch das Blickverhalten greift in diesen Prozess ein, welches im Rahmen dieser Arbeit in das gesteuerte Blickverhalten und das getriggerte Blickverhalten unterschieden wird. Das gesteuerte oder auch willkürliche Blickverhalten beschreibt die strategische Orientierung des Fahrers im Straßenraum. Das getriggerte oder auch unwillkürliche Blickverhalten beschreibt die reflektorische Blickbewegung hin zu einem auffälligen Objekt. Auf den visuellen Wahrnehmungsvorgang wirken zahlreiche Parameter ein, die den Kategorien Umwelteinflüsse, Straßenspezifische Einflüsse, Verkehrsspezifische Einflüsse und Fahrerspezifische Einflüsse (langfristig und kurzfristig wirkenden Variablen) zugeordnet werden. Anhand einer umfassenden Literaturstudie werden die wichtigsten Einflussparameter sowie deren Auswirkungen auf den visuellen Wahrnehmungsvorgang beschrieben und in Form eines Modells graphisch dargestellt. Dabei haben das Alter des Fahrers und die damit verbundenen psychophysischen Veränderungen einen wesentlichen Einfluss auf die Stufen des visuellen Wahrnehmungsvorgangs sowie auf das Blickverhalten. Die Grundfunk-

tionen des Sehens und die zentralen Informationsverarbeitungsprozesse werden beeinträchtigt und das Blickverhalten verändert sich. Aufgrund der prognostizierten demographischen Entwicklung in Deutschland und dem damit verbundenen ansteigenden Anteil älterer Verkehrsteilnehmer sowie angesichts des hohen Einflussgrades des Alterns auf den visuellen Wahrnehmungsvorgang, wird der Einflussparameter Alter des Fahrers, insbesondere in den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen, genauer beobachtet.

In einem eigens dafür eingerichteten Lichtlabor wurde zunächst der Einfluss des Straßenumfeldes auf die subjektiv empfundene Komplexität im Hinblick auf die Wahrnehmbarkeit von Verkehrszeichen untersucht. Dabei wurden den Probanden verschiedene Szenarien deutscher Bundesautobahnen bei Dunkelheit präsentiert, die anhand einer fünfstufigen Skala (1: wenig komplex bis 5: sehr komplex) zu bewerten waren. Die 18 Probanden des Untersuchungsabschnitts I wurden aufgrund ihres Alters den drei Altersgruppen jung, mittel und alt zugeordnet. Alle Probanden wurden als erfahrene Fahrer eingestuft. Es wurde angenommen, dass mit zunehmender Anzahl visueller Informationen im Straßenraum die subjektiv empfundene Komplexität des Fahrers ansteigt. Die statistische Auswertung zeigt, dass die älteren Probanden die Szenarien mit vielen Informationen (Kategorien C und D) um bis zu 1,3 Komplexitätsstufen höher einstufen als die Szenarien mit wenigen Informationen (Kategorien A und B). Zudem bewerten die älteren Probanden die Szenarien um etwa eine Komplexitätsstufe höher als die jungen Probanden. Zwischen den Altersgruppen jung und mittel können keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden. Zum Einen wird die eingeschränkte Leistungsfähigkeit des Gehirns und zum Anderen die vermutete Abneigung gegen Fahrten bei Dunkelheit, deren Ursache auf die physiologischen Einschränkungen im Alter zurückzuführen ist, als Gründe für diese Ergebnisse diskutiert. Ein Einfluss der Parameter Geschlecht, Fahrleistung innerhalb der letzten 12 Monate und Anteil der Nachtfahrten innerhalb der letzten 12 Monate ist nicht nachweisbar. Diese Ergebnisse beruhen auf Untersuchungen unter Laborbedingungen mit einem vergleichsweise kleinen Probandenkollektiv. Es ist davon auszugehen, dass die subjektiv empfundene Komplexität im realen Straßenverkehr aufgrund der größeren Anzahl an Einflussparametern höher bewertet wird.

Des Weiteren wurde im Lichtlabor der Einfluss der Komplexität des Straßenumfeldes auf die Wahrnehmung von Verkehrszeichen untersucht. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, in den Szenarien die Geschwindigkeitsbegrenzungsschilder zu erkennen und zu benennen (Hauptaufgabe). Parallel dazu mussten sie eine Tracking-Aufgabe (Nebenaufgabe) lösen. Insgesamt 23 Probanden nahmen am Untersuchungsabschnitt II teil, gegliedert in die drei Altersgruppen. Alle Probanden wurden als erfahrene Fahrer eingestuft. Es wurde vermutet, je höher die Komplexität des Szenarios, desto mehr Aufmerksamkeit wird der Hauptaufgabe geschenkt und umso ungenauer wird die Nebenaufgabe gelöst. Dass nicht alle Szenarien ein Geschwindigkeitsbegrenzungsschild enthielten, war den Probanden bekannt. Trotzdem wurde angenommen, dass die Probanden beim Fehlen des Verkehrszeichens zu erhöhtem Suchverhalten neigen, wodurch die Lösung der Nebenaufgabe zusätzlich beeinflusst wird. Daher und aufgrund der geringen Datenbasis (der Datenpool wurde demzufolge um die Szenarien ohne Geschwindigkeitsbegrenzungsschild gekürzt) konnten keine belastbare Aussagen zum Einfluss der Komplexität des Straßenumfeldes auf die Wahrnehmung von

Verkehrszeichen getroffen werden. Auch wenn dieser Zusammenhang im Rahmen dieser Arbeit nicht nachgewiesen werden konnte, wird jedoch vermutet, dass dieser insbesondere bei den Fahrern über 60 Jahre vorliegt.

Die Auswertung des Blickverhaltens von drei Probanden der Altersgruppe jung zeigt, dass die Anzahl der Fixationen im Lichtlabor und im freien Feld geringfügig variiert. Dabei werden im Lichtlabor Verkehrszeichen und Werbung geringfügig häufiger fixiert, zum Nachteil der Straße und sonstiger Bauwerke (Brücken, Lärmschutzwände, etc.). Hinsichtlich der Fixationszeiten sind nur geringe Unterschiede feststellbar. Für die Altersgruppen mittel und alt werden ähnliche Ergebnisse erwartet, wobei mit zunehmendem Alter die Differenzen aufgrund zunehmender Beanspruchung des Fahrers im freien Feld ansteigen werden. Aufgrund der geringen Datenmenge insbesondere der fehlenden Daten der Altersgruppe alt können keine allgemeingültigen Aussagen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse getroffen werden. Es wird jedoch vermutet, dass insbesondere die Fahrer der Altersgruppe alt die Szenarien in der Realität hinsichtlich der subjektiv empfundenen Komplexität höher einstufen werden. Weitere Auswertungen auf der Grundlage der Daten von drei Probanden verschiedener Altersgruppen machen deutlich, dass unabhängig vom Alter mit zunehmender Komplexität die Anzahl der Fixationen steigt, wobei der ältere Proband weniger Fixationen ausführt als die beiden jüngeren. Außerdem wird insbesondere für den älteren Probanden deutlich, dass mit zunehmender Komplexität die visuelle Beanspruchung steigt, denn die Anzahl der Fixationen der Nebenaufgabe und der nicht-relevanten Informationen nimmt zu und die Fixationszeiten verringern sich. Auch diese Ergebnisse verdeutlichen, dass mit zunehmendem Alter die Leistungsfähigkeit des Gehirns sowie die Fähigkeit der Aufmerksamkeitsteilung (insbesondere bei steigender Beanspruchung) sinkt und die Ablenkungsanfälligkeit steigt.

Basierend auf 13 Szenarien des Untersuchungsabschnitts I wurde für jede Altersgruppe (jung, mittel, alt) ein Komplexitätsmodell zur rechnerischen Bestimmung der subjektiv empfundenen Komplexität entwickelt. Darin berechnet sich die Objektkomplexität (OK) jedes Objekt aus der Objekteigenschaft (EO), die von den Parametern Lage des Objektes (PF_{xy}), Größe des Objektes (GF) und lichttechnische Auffälligkeit des Objektes (AF) abhängig ist, und der Kognitiven Relevanz (KR) des Objektes. Die Summe aller Objektkomplexitäten und der Parameter NF (Anzahl aller Objekte) ergeben die Komplexität des gesamten Szenarios (K_x). Die mathematischen Zusammenhänge dieser Parameter basieren teilweise auf Untersuchungsergebnissen, teilweise auf Annahmen, welche auf Grundlagenwissen aufbauen. Die statistische Analyse der drei Modelle zeigt, dass zwischen der subjektiv empfundenen (K_{SE}) und der berechneten Komplexität (K_x) ein sehr guter Zusammenhang existiert. Anhand der Regressionsanalyse wird für jedes Modell ein mathematischer Zusammenhang zur rechnerischen Bestimmung der subjektiv empfundenen Komplexität ermittelt.

Das Komplexitätsmodell der Altersgruppe alt sowie 17 Szenarien, die das komplette Bewertungsspektrum der Komplexitätseinstufungen der Altersgruppe alt widerspiegeln, wurden zur Entwicklung einer vorläufigen Checkliste, die als adäquates Mittel bei der Entscheidungsfindung in den Verkehrsbehörden eingesetzt werden kann, herangezogen. Es wurde angenommen, dass Szenarien mit Komplexitätswerten höher als 3,5, den Fahrer soweit beanspruchen, dass eine Wahrnehmung von

relevanten Objekten nur eingeschränkt möglich ist. Demnach wurde der Wert $K_{SE} = 3,5$ als eine wichtige Grenze festgelegt, deren Überschreiten zu vermeiden ist. Die Checkliste beinhaltet drei Grenzwerte, den Grenzwert des Ranges, den Grenzwert des Differenzbetrags b_{EO} und den Grenzwert des „Rauschens“. Aus der Analyse der 17 Szenarien wird deutlich, dass die Komplexitätsstufe 3,5 nicht überschritten wird, wenn die Mehrzahl der relevanten Objekte eines Szenarios, aufgrund ihrer Objekteigenschaften, innerhalb der ersten sieben Ränge liegen. Zudem wird als Grenzwert des Differenzbetrages b_{EO} , der aus der Differenz zwischen den Zahlenwerten („Objekteigenschaft“) des ersten Objektes und des letzten (maximal siebenten) Objektes bestimmt wird, zunächst mit 0,020 festgelegt. Zudem wird vermutet, dass auch die Anzahl der Objekte und deren Verteilung im Straßenraum einen Einfluss auf die subjektiv empfundene Komplexität hat. Also ob die Objekte über das gesamte Szenario verstreut liegen oder ob sie gruppiert im Szenario platziert sind. Dieser Zusammenhang, der als Grenzwert des „Rauschens“ bezeichnet wird, kann anhand der zur Verfügung stehenden Daten nicht geprüft werden. Die vorläufige Checkliste stellt einen Beitrag zur Berücksichtigung der altersbedingten Veränderungen bei der Gestaltung des Straßenraums dar und kann somit zur Erhöhung der Verkehrssicherheit beitragen.

9 Ausblick

Anhand der Literaturrecherche zum Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Teilmodelle des Wahrnehmungsmodells wurde deutlich, dass insbesondere die Einflüsse der Parameter Querschnitt der Straße (ein- und zweibahnig, Anzahl der Fahrstreifen), Verkehrsstärke und gefahrene Geschwindigkeit weiterführend zu erforschen sind, da einerseits Ergebnisse fehlen und andererseits die Ergebnisse aufgrund fehlender Daten wenig aussagekräftig sind. Dabei ist insbesondere das Blickverhalten zu untersuchen, um das entwickelte Komplexitätsmodell in diese Richtung überarbeiten zu können. Derzeit wird angenommen, dass die Fahrer auf Bundesautobahnen insbesondere den rechten Rand des eigenen Fahrstreifens schwerpunktmäßig fixieren. Da die drei o.g. Parameter sich gegenseitig beeinflussen, empfiehlt sich eine gemeinsame Untersuchung. Dabei ist zusätzlich zwischen innerorts und außerorts zu unterscheiden.

Die entwickelten Komplexitätsmodelle der drei Altersgruppen beruhen derzeit:

1. auf Ergebnissen, die unter Laborbedingungen mit einem kleinen Probandenkollektiv erzielt wurden und
2. auf Annahmen zum Einfluss einzelner Objektparameter.

Um die derzeitigen Komplexitätsmodelle der drei Altersgruppen hinsichtlich der realitätsnahen Abbildung erweitern und überarbeiten zu können und somit das Perception-Modell erweitern zu können, bedarf es weiterer Forschung. Im Folgenden werden zwei Untersuchungsmethoden vorgeschlagen:

1. Es muss eine umfangreichere Studie mit einem größeren Probandenkollektiv im realen Straßenraum durchgeführt werden. Um dabei den Einfluss des tatsächlichen Alters auf die subjektiv empfundene Komplexität untersuchen zu können, muss in allen drei Altersgruppen (jung, mittel und alt) jeweils für drei tatsächliche Altersangaben (beispielsweise 25, 30, 35 und 45, 50, 55 und 60, 65, 70) ein ausreichend großer Stichprobenumfang ($n = 10$) gewählt werden. Um den Einfluss des Geschlechts analysieren zu können, muss die Anzahl der weiblichen Probanden und die Anzahl der männlichen Probanden in jeder Altersgruppe ausgeglichen sein. Die Untersuchungen müssen im realen Verkehrsgeschehen durchgeführt werden, wobei der Proband während dem selbständigen Befahren einer realen Teststrecke die subjektiv empfundene Komplexität bestimmter Szenarien bewerten muss. Dabei empfiehlt es sich, einerseits geeignete Vitalfunktionen (beispielsweise Herzfrequenz, Hautleitwert) des Fahrers in Echtzeit aufzuzeichnen und andererseits die bewerteten Szenarien mit einer kalibrierten Kamera aufzunehmen. Auf diese Weise können sowohl die psychische Beanspruchung des Fahrers als auch die realen Objekteigenschaften in das Modell und in die Formulierung der Grenzwerte der Checkliste einfließen.
2. Es müssen zusätzliche Untersuchungen mit bekanntem Ablauf im vorgestellten Lichtlabor (Kapitel 5.2) durchgeführt werden, um die Einflüsse der Objektparameter Lage, Größe, lichttechnische Auffälligkeit und Anzahl der Objekte untersuchen und überarbeiten zu können. Dabei kann durch eine gezielte Variation der Objekte in Lage, Größe, lichttechnische Auffälligkeit und Anzahl

der Einfluss der einzelnen Parameter auf die subjektiv empfundene Komplexität im Hinblick auf die Wahrnehmbarkeit von Verkehrszeichen ermittelt werden.

Die vorläufige Checkliste für die Verkehrsbehörden beruht derzeit:

1. auf Annahmen zum Grenzwert der Komplexität der Szenarien im Hinblick auf die psychische Beanspruchung der älteren Fahrer und
2. auf Grenzwerten, die einerseits auf der Auswertung digitaler Bilder basieren und andererseits bisher nicht untersucht wurden.

Um die Checkliste im Genehmigungsverfahren nicht-relevanter Objekte als adäquates Mittel bei der Entscheidungsfindung einsetzen zu können und somit die Verkehrssicherheit erhöhen zu können, bedarf es weiterer Forschung. Im Folgenden werden zwei Untersuchungsmethoden vorgeschlagen:

1. An dieser Stelle wird auf die zuvor beschriebene umfangreiche Studie im realen Straßenraum verwiesen. Aus dem Vergleich der subjektiven Komplexitätsbewertungen und der fortlaufend aufgezeichneten Vitalfunktionen (beispielsweise Herzfrequenz, Hautleitwert) kann die psychische Beanspruchung der Fahrer in Abhängigkeit von der subjektiv empfundenen Komplexität analysiert werden. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse sind die Komplexitätsgrenzwerte zu prüfen und gegebenenfalls zu erweitern.
2. Um die Grenzwerte in der Checkliste realitätsnah bestimmen zu können, wird empfohlen, auf der Basis der Aufnahmen mit der kalibrierten Kamera aus der zuvor beschriebenen umfangreichen Studie, die derzeitigen Grenzwerte zu prüfen und zu überarbeiten. Dabei ist der unter 1. ermittelte Komplexitätsgrenzwert einzuhalten. Anhand der Aufnahmen des realen Straßenraums sind die Objekteigenschaften EO der einzelnen Objekte zu bestimmen, basierend darauf sind der Grenzwert des Ranges relevanter Objekte sowie der Grenzwert des Differenzbetrags b_{EO} zu untersuchen und gegebenenfalls zu korrigieren. Außerdem sind die noch offenen Fragen zu untersuchen, bspw. welchen Einfluss die Objekteigenschaften der relevanten Objekte auf die subjektiv empfundene Komplexität ausüben, wenn sie sich hinsichtlich ihrer Objekteigenschaften auf den ersten Rängen befinden, noch vor den nicht-relevanten Objekten. Die Ergebnisse sind entsprechend in die Checkliste aufzunehmen. Des Weiteren ist anhand der Aufnahmen des realen Straßenraums zu untersuchen, in wie weit die Anzahl und die Verteilung der Objekte mit einem geringen Zahlenwert „Objekteigenschaft“ Einfluss auf die subjektiv empfundene Komplexität und somit auf die Beanspruchung des Fahrers nehmen. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen als Grenzwert des „Rauschens“ formuliert und in die Checkliste eingefügt werden.

Die Auswertung der Szenarien hinsichtlich der Bestimmung der Komplexität sowie die Anwendung der Checkliste erfolgt derzeit noch manuell. Es wird vorgeschlagen, diesen Prozess der Bildverarbeitung durch ein entsprechendes Computerprogramm zu automatisieren. Dadurch kann die praktische Anwendung der Checkliste vereinfacht und somit der Einsatz, beispielsweise im Genehmigungsverfahren nicht-relevanter Objekte ermöglicht werden.

10 Literaturverzeichnis

- [1] ABENDROTH, B.
Gestaltungspotentiale für ein PKW-Abstandsregelsystem unter Berücksichtigung verschiedener Fahrertypen, Bericht aus dem Institut für Arbeitswissenschaft der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt 2001
- [2] AKAGI, Y.; SEO, T.; MOTODA, Y.
Influence of Visual Environments on Visibility of Traffic Signs, Transportation Research Record 1553, 1996
- [3] AULHORN, E.
Einschränkung der Fahreignung durch Sehmängel und Grenzen ihrer Kompensation. In: Bericht über das 7. Symposium Verkehrsmedizin des ADAC, Wahrnehmung und Verkehrssicherheit, Schriftenreihe Straßenverkehr 32, München 1987
- [4] BAGL, M.; KABA, A.; MUCK, B.; SCHMOTZER, CH.; STEINBAUER, J.
Visuelle Orientierung im Straßenverkehr – Optimierung von Verkehrsinformationseinrichtungen, Teil B: Metaanalyse, Forschungsarbeiten aus dem Verkehrswesen, Band 96, Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr, Wien 1999
- [5] BALD, J. ST.
Grundlagen für die Anwendung von Risikoanalysen im Straßenwesen, Dissertation am Fachbereich Wasser und Verkehr der Technischen Hochschule Darmstadt, Darmstadt 1991
- [6] BEJIER, D.; SMILEY, A.; EIZENMAN, M.
Observed Driver Glance Behavior at Roadside Advertising Signs, Journal of the Transportation Board, No. 1899, National Research Council, Washington D. C., 2004
- [7] BERGER, W. J.
Informationsaufnahme und Wahrnehmungsverhalten im Straßenverkehr. In: Informationsaufnahme und Informationssysteme im Straßenverkehr., Lebensraum Verkehr – Kleine Fachbuchreihe des KfV, Band 29, Wien 1993
- [8] BODROGI, P.; SCHANDA, J.; KHANH, T. Q.
Forschungspotentiale und jüngste Forschungsergebnisse im mesopischen Bereich für eine wahrnehmungsgerechte Verkehrs- und Kfz-Lichttechnik, Licht 2008, 10.-13. September 2008, Ilmenau
- [9] BORTZ, J.
Lehrbuch der Statistik – Für Sozialwissenschaftler, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo, 1985

- [10] BUBB, H.
Blickanalyse zur Ermittlung der Aufmerksamkeitszuwendung zu Informationssysteme. In: Informations- und Assistenzsysteme im Auto benutzergerecht gestalten – Methoden für den Entwicklungsprozeß., Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit, Heft M 116, Bergisch Gladbach, 2000
- [11] COHEN, A. S.
Augenbewegungen des Autofahrers beim Vorbeifahren an unvorhersehbaren Hindernissen und auf freier Strecke. Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Heft 22, 1976
- [12] COHEN, A. S.
Visuelle Informationsaufnahme während der Fahrzeugsteuerung in Abhängigkeit der Umweltmerkmale und der Fahrpraxis, Schweizerische Zeitschrift für Psychologie, Heft 44, 1985
- [13] COHEN, A. S.
Möglichkeiten und Grenzen visueller Wahrnehmung im Straßenverkehr, Teil I: Wahrnehmung und Schätzung von Geschwindigkeiten und Teil II: Informationsdefizite während nächtlicher Fahrten, Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr, Heft 57, Herausgegeben im Auftrag des Bundesministers für Verkehr von der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung, Bergisch Gladbach, 1986
- [14] COHEN, A. S.
Experimentelle Analyse der Informationsaufnahme und -verarbeitung beim Autofahren, Vortrag im Bericht über das 7. Symposium Verkehrsmedizin des ADAC, Wahrnehmung und Verkehrssicherheit, Schriftenreihe Straßenverkehr 32, München 1987a
- [15] COHEN, A. S.
Nutzbarer Sehfeldumfang und seine Variation in Feldsituation. Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie, Band XXXIV, Heft 1, 1987b
- [16] COHEN, A. S.
Blickverhalten und Informationsaufnahme von Kraftfahrern, Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung, Bergisch Gladbach 1987c
- [17] COHEN, A. S.
Verkehrszeichen, Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Heft 40, 1994
- [18] COHEN, A. S.
Visuelle Orientierung im Straßenverkehr – Eine empirische Untersuchung zur Theorie des visuellen Abtastens, Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung, bfu-Report 34, Bern 1998

- [19] COMMISSION INTERNATIONALE DE L' ECLAIRAGE [CIE]
Visual Performance in the mesopic range, TC1-58, Technical Report, Draft 5, 2009
- [20] DIEM, C.
Blickverhalten von Kraftfahrern im dynamischen Straßenverkehr, Dissertation am Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt 2004
- [21] DOHMAN, M.
Probleme der optischen Führung bei Nacht und Nässe, Straßenverkehrstechnik, Heft 5, 1982
- [22] DURTH, W.
Nebel im Straßenverkehr – Auftreten, Risiko und Maßnahmen dagegen, Straße und Autobahn, Heft 9, 2000
- [23] ECKERT, M.
Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr. 1. Auflage, Verlag Technik GmbH, Berlin · München, 1993
- [24] ELHOLMA, M.; VIIKARI, M.; HALONEN, L.; WALKEY, H.; GOODMAN, T.; ALFERDINCK, J.; FREIDING, A.; BODROGI, P.; VÁRADY, G.
Mesopic models – from brightness matching to visual performance in night-time driving: a review, Lighting Research and Technology, Heft 37, 2005
- [25] FÄRBER, B.
Geteilte Aufmerksamkeit: Grundlagen und Anwendung im motorisierten Straßenverkehr, Verlag TÜV Rheinland, Köln 1987
- [26] FÄRBER, B.; FÄRBER, B.; SIEGENER W.; SÜTHER, B.
Aufnahme von Wegweisungsinformationen im Straßenverkehr - AWewiS, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 979, Herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn 2007
- [27] FARBRY, J.; WOCHINGER, K.; SHAFER, T.; OWENS, N.; NEDZESKY, A.
Research Review of Potential Safety Effects of Elektronik Billboards on Driver Attention and Distraction, Final Report, Human Centered Systems Team, Office of Safety Research and Development, Federal Highway Administration, Washington D.C., 2001
- [28] FASTENMEIER, W.
Verkehrstechnische und verhaltensbezogene Merkmale von Fahrstrecken – Entwicklung und Erprobung einer Typologie von Straßenverkehrssituationen. Dissertation am Lehrstuhl für Psychologie, Fakultät für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften der Technischen Universität München, München 1994

- [29] FASTENMEIER, W.; GSTALTER, H.; EGGERDINGER, CH.; GALSTERER, H.
Der ältere Mensch als Autofahrer. Münchner Medizinische Wochenschrift, Heft 40, 2005
- [30] FRANK, H.
Grundlagen der Verkehrslichttechnik, Umdruck Lichttechnikseminar 2003, Mechatronic GmbH Darmstadt, Darmstadt 2003
- [31] FREIDING, A.; ELHOLMA, M; KETOMÄKI, J.; HALONEN, L.; WALKEY, H.; GOODMAN, T.; ALFERDINCK, J.; VÁRADY, G.; BODROGI, P.
Mesopic visual efficiency I: detection threshold measurements, Lighting Research and Technology, Heft 39, 2007
- [32] FRITSCHER, K.
Aufnahme von Wegweisungsinformationen, Diplomarbeit am Fachgebiet Straßenwesen mit Versuchsanstalt der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt 2005
- [33] GALLEY, N.
Erfassung von Blickbewegungen. In: Die Orientierung im Straßenverkehr bei Nachtfahrten, Schriftenreihe der Forschungsgemeinschaft Auto-Sicht-Sicherheit (A.S.S.) e.V., Verlag TÜV Rheinland, Köln 1988
- [34] GEGENFURTNER, K. R.
Gehirn & Wahrnehmung, 2. Auflage, Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt am Main 2003
- [35] GETZBERGER, J.
Der Einfluss von Leuchtdichte, Fläche, Kontrast, Ortsfrequenz und Orientierung auf den Auslösemechanismus von Sakkaden in strukturierten und nicht strukturierten Umfeldern, Dissertation im Fachbereich Physik der Ludwig-Maximilian-Universität zu München, München 1976
- [36] GOLDSTEIN, E. B.
Wahrnehmungspsychologie, 2. deutsche Auflage, Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg, Berlin 2002
- [37] GOTTLIEB, W.
Belastung und Beanspruchung bei Ablesen von Wegweisern, Dissertation an der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig 1981
- [38] GRAMBERG-DANIELSEN, B.
Das Sehen in der Dämmerung, Vortrag im Kongreßbericht 1984 der Deutschen Gesellschaft für Verkehrsmedizin e. V., Unfall und Sicherheitsforschung Straßenverkehr, Heft 47, Herausgegeben im Auftrage des Bundesministers für Verkehr von der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 1984

- [39] GRAMBERG-DANIELSEN, B.; HARTMANN, E.; GIEHRING, H.
Der Dunkelheitsunfall, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, Stuttgart 1984
- [40] HARTMANN, E.
So durchschauen Sie Ihre Augen, ADAC motorwelt 11/81, München 1981
- [41] HAV
Hinweise für das Anbringen von Verkehrszeichen und
Verkehrseinrichtungen, Verkehrstechnischer Kommentar, 12. Auflage,
Kirschbaum Verlag Bonn, 2002
- [42] HAWKINS, R. K.
Verkehrsverhalten auf Autobahnen unter Bedingungen eingeschränkter
Sicht, Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Heft 34, 1988
- [43] HEINRICH, H. C.
Aspekte der visuellen Wahrnehmung im Straßenverkehr. Zeitschrift für
Verkehrssicherheit, Heft 33, 1987
- [44] HESSE, J.; KRUEGER, H.; ZÜLCH, J.
Der Einfluß der Anpassungsfähigkeit des Auges auf die visuelle
Wahrnehmung, Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen,
Bereich Unfallforschung, Bergisch Gladbach 1985
- [45] HOHMANN, A.
Sehfähigkeit und Wahrnehmungsvermögen im Straßenverkehr,
Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach
1991
- [46] IAD (INSTITUT FÜR ARBEITSWISSENSCHAFT)
http://www.arbeitswissenschaft.de/website/research/lab/blickbewegu_119/de/de_blickbewegu_univer_1.php, Internetauftritt, Juli 2008
- [47] JANSSEN, J.; LAATZ, W.
Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows, 6. Auflage,
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2007
- [48] KARNATH, H.-O.; THIER, P.
Neuropsychologie, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2003
- [49] KETTWICH, C.; KLINGER, K.; LEMMER, U.
Influence of advertisements on the driver's behaviour in the road traffic
scene, written contribution in Proceedings of the 7th International
Symposium of Automotive Lighting (ISAL), Herbert Utz Verlag
Wissenschaft, München 2007
- [50] KETTWICH, C.; KOOß, D.; LEMMER, U.
Do advertisements at the roadside distract the driver?, Optical Sensors 2008
(Proceedings of SPIE), SPIE Society of Photo-Optical Instrumentation
Engineers (6. Juni 2008), 2008

- [51] KHANH; T. Q.
Physiologische und psychophysische Aspekte in der Photometrie, Colorimetrie und in der Farbbildverarbeitung, Habilitationsschrift der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau, 2004a
- [52] KHANH, T. Q
Lichttechnische Einflussfaktoren auf die visuelle Wahrnehmung und den menschlichen Biorhythmus, Forschung & Technik, Licht 10/2004b
- [53] KHANH, T. Q.
Über die Helligkeit farbiger Objekte unter einem großen Sehfeld – Berechnungsmodelle, visuelle Tests, Artikel in Farbe interdisziplinär Jahrbuch 2006, Dr. Andreas Schwarz, Essen, Eigenverlag 2006
- [54] KHANH; T. Q.
Physiologie des Sehens, Vorlesung vom 08.12.2008
- [55] KHANH, T. Q; HACKER, CH.
On the tests of supplementary systems of photometry and colorimetry for the fovea field of 2°-matching experiments and development of the scotopic luminance meter, Artikel in Farbe interdisziplinär, Jahrbuch 2006, Dr. Andreas Schwarz, Essen, Eigenverlag 2006
- [56] KIEGELAND, P.
Fahrzeugführung im Nebel, Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Heft 42, 1996
- [57] KNOFLACHER, H.
Verkehrsplanung für den Menschen, Band 1 Grundstrukturen, Wirtschaftsverlag Dr. Anton Orac, Wien 1987
- [58] KUHL, P.
Anpassung der Lichtverteilung des Abblendlichtes an den vertikalen Straßenverlauf, Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Paderborn, Paderborn 2006
- [59] LACHENMAYR, B.
Reaktionszeiten im Straßenverkehr: Beeinflussung durch die Beanspruchung des Fahrers, Vortrag im Bericht über das 7. Symposium Verkehrsmedizin des ADAC, Wahrnehmung und Verkehrssicherheit, Schriftenreihe Straßenverkehr 32, München 1987
- [60] LACHENMAYR, B.
Sehen und gesehen werden: Sicher unterwegs im Straßenverkehr. Verlag Shaker, Aachen 1995
- [61] LACHENMAYR, B.; BUSER, A.; KELLER, O.
Sehstörungen als Unfallursache, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit, Heft M65, Bergisch Gladbach 1996

- [62] LIPPOLD, CH.
Zum Unfallgeschehen bei Nebel und der Zweckmäßigkeit von mobilen oder stationären Nebelwarnanlagen, Straßenverkehrstechnik, Heft 5, 2000
- [63] LUFF, K.
Probleme des verkehrsgerechten Sehens. In: Die Orientierung im Straßenverkehr bei Nachtfahrten, Schriftenreihe der Forschungsgemeinschaft Auto-Sicht-Sicherheit (A.S.S.) e.V., Verlag TÜV Rheinland, Köln 1988
- [64] MEINOLD, P. E.
Psychologie des Lidschlags – eine literatur- und methodenkritische Studie, Dissertation an der Philosophischen Fakultät der Universität zu Köln, Lippstadt 2005
- [65] METHLING, D.; PESCHKE, M.
Licht, Beleuchtung und Sehen in der Arbeitsumwelt, 2., überarbeitete Auflage, Verlag Tribüne Berlin, Berlin 1987
- [66] MÜLLER-LIMMROTH, W.
Zentralnervöse Voraussetzungen für die Informationsaufnahme und –verarbeitung im Straßenverkehr, Vortrag im Bericht über das 7. Symposium Verkehrsmedizin des ADAC, Wahrnehmung und Verkehrssicherheit, Schriftenreihe Straßenverkehr 32, München 1987
- [67] PANNASCH, S.
Beeinflussung von Blickstrategien durch räumlich/verbale Nebenaufgaben beim Autofahren, Diplomarbeit Fachrichtung Psychologie an der Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften der Technischen Universität Dresden, Dresden 1999
- [68] PANNASCH, S.
Ereignisbezogene Veränderungen der visuellen Fixationsdauer, Dissertation an der Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften der Technischen Universität Dresden, Dresden 2003
- [69] REITTER, CH.
Beanspruchung des Autofahrers durch Monotonie: Eine Untersuchung mit blick- und lidmotorischen Parametern, Dissertation, Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme an der Technischen Universität Berlin, Berlin 2001
- [70] RÖNSCH-HASSELHORN, B.
Sichtbeeinträchtigung für Autofahrer durch Sonnenblendung, Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Heft 49, 2003
- [71] SAGAWA, K.
Toward a CIE supplementary system of photometrie: brightness at any level including mesopic vision, Ophthal. Physiol. Opt., pp. 240-245, 2006

- [72] SCHLAG, B.; RICHTER, S.
Wahrnehmungs- und sozialpsychologische Hintergründe von
Nebelunfällen, Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Heft 46, 2000
- [73] SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J.; FREIDING, A.
Sehvermögen von Kraftfahrern und Lichtbedingungen im nächtlichen
Straßenverkehr, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und
Sicherheit, Heft M 158, Bergisch Gladbach 2004
- [74] SCHNEIDER, W.; CHMIELARZ, M.; CHURAN, J.; CUNNINGHAM, G.-R.; DERKUM,
H.; GINSCHER, M.; THEIL, L.
Wahrnehmung von Verkehrszeichen, Forschung Straßenbau und
Straßenverkehrstechnik, Heft 697, Herausgegeben vom Bundesminister für
Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr,
Bonn 1995
- [75] SCHÖNBACH, P.
Massenunfälle im Nebel, Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Heft 47, 2001
- [76] SCHOLLERER, E.; STRICKER, D.; SURY, P.; GRONER, M. T.
Fahrverhalten und Werbung – Eine Simulatorstudie mit
Blickrichtungsmessung, Verkehrsforschung Online, Ausgabe 4, 2007
- [77] SCHWEIGERT, M.
Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben. Dissertation am Lehrstuhl
Ergonomie der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität
München, München 2003
- [78] SEDLMEIER, P.; RENKEWITZ, F.
Forschungsmethoden und Statistik in der Psychologie, Pearson Studium,
München 2008
- [79] SMILEY, A.; SMAHEL, TH.; EIZENMAN, M.
Impact of Video Advertising on Driver Fixation Patterns, Journal of the
Transportation Board, No. 1899, National Research Council, Washington D.
C. 2004
- [80] STATISTISCHES BUNDESAMT
<http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Navigation/Statistiken/Bevoelkerung/Bevoelkerung.psml>,
Internetauftritt, August 2008
- [81] THEOFANOU, D.
Maße zur Erfassung von visueller Ablenkung bei verschiedenen komplexen
Streckenabschnitten. Dissertation an der Philosophischen Fakultät II
(Psychologie und Pädagogik) der Universität Regensburg, Regensburg 2002

- [82] TRÄNKLE, U.; METKER, T.
Über die Schwierigkeiten, die jüngere und ältere Fahrerinnen und Fahrer bei verschiedenen Fahr- und Manövrieraufgaben erleben, Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Heft 38, 1992
- [83] UNGERER, D.
Innerörtliche Werbeanlagen und Sicherheitsrisiko – eine vorläufige Stellungnahme zur Wechselwerbung – Im Auftrag des Deutschen Verkehrssicherheitsrates, Universität Bremen, Sicherheitswissenschaft, Bremen, unveröffentlicht, ohne Jahrgang (o. J.)
- [84] VÁRADY, G.; FREIDING, A.; ELOHOLMA, M.; HALONEN, L.; WALKEY, H.; GOODMAN, T.; ALFERDINCK, J.
Mesopic visual efficiency III: Discrimination threshold measurements, Lighting Research and Technology, Heft 39, 2007
- [85] WALKEY, H.; ORREVELTÄINEN, P.; BARBUR, J.; HALONEN, L.; GOODMAN, T.; ALFERDINCK, J.; FREIDING, A.; SZALMÁS, A.
Mesopic visual efficiency II: reaction time experiments, Lighting Research and Technology, Heft 39, 2007
- [86] WALLACE, B.
External – To – Vehicle Driver Distraction, Transportation Research Series, Scottish Executive Social Research, Edinburgh 2003
- [87] WEISE, J.
Beitrag zur Entwicklung eines optimierten Bremsassistenten, Bericht aus dem Institut für Arbeitswissenschaft der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt 2003
- [88] WELSCH, N.; LIEBMANN, C. CHR.
Farben - Natur Technik Kunst, 2. Auflage – Sonderausgabe, Elsevier Spektrum Akademischer Verlag München, München 2004
- [89] WILHELM, B.; WILHELM, H.
Das Pupillenverhalten verrät Übermüdung, Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Heft 41, 1995
- [90] WÖRDENWEBER, B.
Mensch im Verkehr, Seminar 3b, Einführung in die Lichttechnik, Universität Paderborn, <http://www.l-lab.de/Docs/Lehre/03B%20VT%20Mensch%20im%20Verkehr.pdf>, Internetauftritt August 2008
- [91] ZÖFEL, P.
Statistik verstehen – Ein Begleitbuch zur computergestützten Anwendung, Addison-Wesley Verlag, München 2002

11 Formelzeichen, Abkürzungen

11.1 Allgemeine Formelzeichen

Variable	Definition	Einheit
α	Sehwinkel des Objektes	Grad (°)
Θ	Blendwinkel	Grad (°)
L	Photopische Leuchtdichte	Candela pro Quadratmeter (cd/m ²)
L ₁₀	Photopische Leuchtdichte für das 10°-Sehfeld nach der V ₁₀ (λ)-Funktion	(cd/m ²)
L'	Skotopische Leuchtdichte	(cd/m ²)
L _{aeq} bzw. L _{eq}	Äquivalente Leuchtdichte	(cd/m ²)
L _O	Objektleuchtdichte	(cd/m ²)
L _U	Umfeldleuchtdichte	(cd/m ²)
L _{mes}	Mesopische Leuchtdichte	(cd/m ²)
L _P	Photopischen Leuchtdichte	(cd/m ²)
L _S	Skotopische Leuchtdichte	(cd/m ²)
L _{Seq}	Schleierleuchtdichte	(cd/m ²)
ΔL	Leuchtdichteunterschied	(cd/m ²)
ΔL _S	Schwellenleuchtdichteunterschied	(cd/m ²)
E _B	Blendbeleuchtungsstärke	Lux (lx)
K _P	Maximum der Leuchtdichtewirksamkeit im photopischen Bereich	Lumen pro Watt (lm/W)
K _S	Maximum der Leuchtdichtewirksamkeit im skotopischen Bereich	Lumen pro Watt (lm/W)
V(λ)	Spektrale Empfindlichkeitsfunktion für das photopische Sehen im 2°-Sehfeld	-
V ₁₀ (λ)	Spektrale Empfindlichkeitsfunktion für das photopische Sehen im 10°-Sehfeld	-
V'(λ)	Spektrale Empfindlichkeitsfunktion für das skotopische Sehen	-
V'(λ ₀)	Spektrale Empfindlichkeitsfunktion für das skotopische Sehen bei einer Wellenlänge von 555 nm	-
V _{mes} (λ)	Spektrale Empfindlichkeitsfunktion für das mesopische Sehen	-
ρ _d	Reflexionsgrad	%
CIELAB L*	Photometrisches Helligkeitsempfinden	-
Y	Farbwert des XYZ-Farbraums (Hellbezugswert)	-
Y _n	Helligkeitsanteil des Referenzweiß (gammakorrigiert)	-

11.2 Eingeführte Formelzeichen

Variable	Definition	Einheit
PF_{xy}	Lage des Objektes	-
PF_x	Lage des Objektes – Anteil horizontal	-
Pf_y	Lage des Objektes – Anteil vertikal	-
GF	Größe des Objektes	-
AF	Lichttechnische Auffälligkeit des Objektes	-
EO	Objekteigenschaft	-
KR	Kognitive Relevanz des Objektes	-
OK	Objektkomplexität	-
NF	Anzahl aller Objekte	-
K_X	Komplexität des Szenarios, berechnet anhand des Modells	-
K_{SE}	Subjektiv empfundene Komplexität des Szenarios im Hinblick auf die Wahrnehmbarkeit von Verkehrszeichen	-
b_{EO}	Differenzbetrag der Objekteigenschaften	-
b_{EOkrit}	Kritischer Differenzbetrag der Objekteigenschaften	-

11.3 Abkürzungen

VZ	Verkehrszeichen
HAV	Hinweise für das Anbringen von Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen
DIN	Deutsches Institut für Normung
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobilclub e.V.
BAB	Bundesautobahnen
CIE	Commission Internationale de l' Eclairage (deutsch: Internationale Beleuchtungskommission)
TC1-58	Technical Comitee, Division 1 ,Vision and Colour', 58
KB	Komplexitätsbereich

Danksagungen

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Fachgebiet Straßenwesen der Technischen Universität Darmstadt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Stefan Bald, dem Leiter des Fachgebiets Straßenwesen, gilt mein erster Dank, denn er hat mir die Möglichkeit zur Erstellung dieser Arbeit geboten und durch zahlreiche Diskussionen meine Sichtweise auf die wichtigen Dinge gelenkt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit, die vielen wertvollen Anregungen und die Übernahme des Korreferates.

Zudem möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Peter Bodrogi für die fachlichen Diskussionen und Hinweise bedanken.

Des Weiteren danke ich Herrn Dr.-Ing. Helmut Frank und Frau Ingrid Bloss für die Diskussionen und Anregungen, die schlussendlich zur endgültigen Themenfindung beigetragen haben.

Großer Dank gilt auch allen meinen Kollegen vom Fachgebiet Straßenwesen, insbesondere Frau Dipl.-Wirtsch.-Ing. Verena Rosauer, die mir nicht nur in fachlicher Hinsicht sondern auch moralisch immer mit Rat und Tat zur Seite stand.

Darüber hinaus danke ich allen Mitarbeitern vom Fachgebiet Lichttechnik, speziell für die nächtliche Aktion auf dem Griesheimer Flugplatz und die fachliche Unterstützung.

Außerdem danke ich dem Institut für Arbeitswissenschaft der Technischen Universität Darmstadt, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Klaus Fuchs, für die Bereitstellung des Blickbeobachtungshelms und die Einführung in die Auswertesoftware.

Auch den vielen Probanden möchte ich danken, ohne sie wäre die Durchführung der Untersuchungen nicht möglich gewesen. Vielen Dank an alle Kollegen des Instituts für Verkehr und an alle Freunde und Bekannten.

Neben der fachlichen Unterstützung ist für eine solche Arbeit vor allen Dingen Kraft, Zeit und Verständnis notwendig. Dafür möchte ich mich bei meinen Eltern und ganz besonders bei meinem Mann Mario und unserer Tochter Emma bedanken.

Curriculum Vitae

Persönliche Daten

geboren am 16. Mai 1978 in Dohna

Schulbesuch

1984 bis 1992 Polytechnische Oberschule Großpostwitz

1992 bis 1996 Städtisches Gymnasium Wilthen

Berufsausbildung

1996 bis 2001 Diplomstudiengang Bauingenieurwesen an der
Technischen Universität Dresden
Studienrichtung Stadtbauwesen und Verkehrswegebau

Berufstätigkeit

2001 bis 2010 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Straßenwesen der
Technischen Universität Darmstadt

Anhang

Inhaltsverzeichnis Anhang

Bildverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	VII
A1 Das menschliche Auge	9
A1.1 Allgemeines	9
A1.2 Der vordere Teil des Auges	9
A1.3 Der hintere Teil des Auges	10
A1.3.1 Aufbau der Netzhaut	10
A1.3.2 Die Photorezeptoren und ihre Funktionsweise	11
A1.3.3 Die neuronale Verschaltung	13
A1.4 Die Farbwahrnehmung	14
A1.4.1 Theorien	14
A1.4.2 Die Farbcodierung in der Netzhaut	16
A1.5 Adaptationszustände	16
A2 Aufbau der Hirnareale und Verarbeitung der Signale	18
A2.1 Allgemeines	18
A2.2 Chiasma opticum	18
A2.3 Corpus geniculatum laterale	18
A2.3.1 Allgemeines	18
A2.3.2 Die Informationsverarbeitung	19
A2.4 Primärer visueller Cortex	20
A2.4.1 Allgemeines	20
A2.4.2 Die Informationsverarbeitung	20
A2.5 Extrastriärer Cortex	21
A2.5.1 Allgemeines	21
A2.5.2 Die Informationsverarbeitung	21
A2.6 Die Verknüpfung cortikaler Signale	23
A2.6.1 Allgemeines	23
A2.6.2 Der sensorische Code	23

Anhang

A3 Die Wahrnehmung von Objekten	25
A3.1 Allgemeines	25
A3.2 Überblick	25
A3.3 Erklärungsansätze der Objektwahrnehmung	26
A3.3.1 Allgemeines	26
A3.3.2 Die Gestaltpsychologie	27
A3.3.2.1 Die Gestaltfaktoren	27
A3.3.2.2 Die Figur-Grund-Trennung	31
A3.3.3 Der Algorithmische Ansatz	31
A3.3.4 Die Merkmalsintegrationstheorie	32
A3.3.5 Theorie des Objektwahrnehmens mittels elementarer Teilkörper	34
A3.3.6 Kanonische Ansichten	35
A4 Das ausführliche Perception-Modell	36
A5 Das Lichtlabor	37
A5.1 Lichttechnische Messungen der Projektionsleinwand	37
A5.2 Überprüfung der Übereinstimmung von Realität und Labor	38
A6 Angaben zum Probandenkollektiv	42
A6.1 Fragebogen	42
A6.2 Fahrerdemographische Daten des „Stammkollektivs“ und der zusätzlichen fünf Probanden des Untersuchungsabschnitts II	43
A7 Statistischen Auswertungen weiterer Parameter des Untersuchungsabschnitts I sowie ergänzende Daten	44
A7.1 Der Einfluss des Geschlechts	44
A7.1.1 Allgemeines	44
A7.1.2 Statistische Analyse des Parameters <i>Geschlecht</i>	44
A7.1.3 Diskussion der Ergebnisse	46
A7.2 Der Einfluss der Fahrleistung	47
A7.2.1 Allgemeines	47
A7.2.2 Statistische Analyse des Parameters <i>Fahrleistung</i>	47
A7.2.3 Diskussion der Ergebnisse	49
A7.3 Der Einfluss des Anteils der Nachtfahrten	50
A7.3.1 Allgemeines	50
A7.3.2 Statistische Analyse des Parameters <i>Anteil der Nachtfahrten</i>	50
A7.3.3 Diskussion der Ergebnisse	53

Anhang

A7.4	Der Einfluss der Wiederholung	54
A7.4.1	Allgemeines	54
A7.4.2	Statistische Analyse des Parameters <i>Wiederholung</i>	54
A7.4.3	Diskussion der Ergebnisse	59
A7.5	Ergänzende Daten zum Parameter Kategorie	60
A7.5.1	Mediane aller Probanden getrennt nach Kategorie	60
A8	Daten für die Auswertungen des Untersuchungsabschnitts II	63
A8.1	Daten der Probanden der Altersgruppe mittel	63
A8.2	Daten der Probanden der Altersgruppen alt und alt*	75
A9	Daten für die statistischen Auswertungen der Komplexitätsmodelle	89
A9.1	Daten der Altersgruppen jung und mittel	89
A9.2	Ergebnisse der Absicherung der Regressionskoeffizienten	90
A9.3	Ergebnisse für das Beispielszenario	93
A10	Daten zur Grenzwertermittlung der vorläufigen Checkliste	94
A10.1	Aufgelistete Objekteigenschaften der 17 Szenarien	94
A10.2	Beispielszenarien	101
A10.3	Berechnete Differenzbeträge b_{EO} der betreffenden Szenarien	104

Bildverzeichnis

Bild A1.1:	Querschnitt durch das menschliche Auge [GEGENFURTNER, 2003]	9
Bild A1.2:	Querschnitt durch die Netzhaut des Auges [GOLDSTEIN, 2002]	11
Bild A1.3:	Verteilung der Photorezeptoren auf der Netzhaut [GOLDSTEIN, 2002]	12
Bild A1.4:	Spektrale Absorptionskurven der menschlichen Rot-, Grün- und Blauzapfen [KARNATH und THIER, 2003]	13
Bild A1.5:	Entladungsmuster der drei Zapfenarten auf unterschiedliche Farben [GOLDSTEIN, 2002]	15
Bild A1.6:	Darstellung der drei Gegenfarbenmechanismen [GOLDSTEIN, 2002]	15
Bild A1.7:	Schema eines neuronalen Schaltkreises [GOLDSTEIN, 2002]	16
Bild A2.1:	Beschreibung des Chiasma opticum [WELSCH UND LIEBMANN, 2004]	18
Bild A2.2:	Schematischer Aufbau des CGL [GOLDSTEIN, 2002]	19
Bild A2.3:	Einfließende und ausströmende Informationen des CGL [GOLDSTEIN, 2002]	20
Bild A2.4:	Vereinfachte Darstellung der beiden Verarbeitungsbahnen [GOLDSTEIN, 2002]	22
Bild A3.1:	Beispiel für den Faktor der Prägnanz [GOLDSTEIN, 2002]	27
Bild A3.2:	Beispiel für den Faktor der Ähnlichkeit [GOLDSTEIN, 2002]	28
Bild A3.3:	Beispiel für den Faktor der gestaltgerechten Linienfortsetzung [GOLDSTEIN, 2002]	28
Bild A3.4:	Beispiel für den Faktor der Nähe [GOLDSTEIN, 2002]	29
Bild A3.5:	Beispiel für den Faktor des gemeinsamen Schicksals	29
Bild A3.6:	Beispiel für den Faktor der Bedeutung	30
Bild A3.7:	Beispiel für den Faktor der gemeinsamen Region, den Faktor der Verbundenheit der Elemente und den Faktor der zeitlichen Synchronizität [GOLDSTEIN, 2002]	31
Bild A3.8:	Modell des algorithmischen Ansatzes (MARR, 1982 in [GOLDSTEIN, 2002])	31
Bild A3.9:	Modell der Merkmalsintegrationstheorie (TREISMAN, 1998 in [GOLDSTEIN, 2002])	32
Bild A3.10:	Beispiele für Texturbereichstrennung infolge von Textonunterschieden (nach Nothdurft, 1990 in [GOLDSTEIN, 2002])	33
Bild A3.11:	Geone (BIEDERMAN, 1987 in [GOLDSTEIN, 2002])	34
Bild A4.1:	Ausführlicher Aufbau des Perception-Modells	36

Anhang

Bild A5.1:	Gegenüberstellung der mittlere Leuchtdichten der Verkehrszeichen in der Realität und im Labor für den Audi A5 (XE)	38
Bild A5.2:	Gegenüberstellung der mittlere Leuchtdichten der Umfeld der Verkehrszeichen in der Realität und im Labor für den Audi A5 (XE)	38
Bild A5.3:	Gegenüberstellung der mittlere Leuchtdichten der Verkehrszeichen in der Realität und im Labor für den Audi A6 (XE)	39
Bild A5.4:	Gegenüberstellung der mittlere Leuchtdichten der Umfeld der Verkehrszeichen in der Realität und im Labor für den Audi A6 (XE)	39
Bild A5.5:	Gegenüberstellung der Kontraste in der Realität und im Labor für den Audi A5 (XE)	40
Bild A5.6:	Gegenüberstellung der Kontraste in der Realität und im Labor für den Audi A6 (XE)	40
Bild A6.1:	Fragebogen zur Erfassung der fahrerdemographischen Merkmale	42
Bild A 7.1:	Individuelle Mediane der subjektiv empfundene Komplexität für jeden Probanden – gruppiert nach Geschlecht	45
Bild A 7.2:	Median, Minimum und Maximum für männliche und für weibliche Probanden	45
Bild A 7.3:	Individuelle Mediane der subjektiv empfundene Komplexität für jeden Probanden – gruppiert nach Fahrleistung innerhalb der letzten 12 Monate	48
Bild A 7.4:	Median, Minimum und Maximum für die drei Ausprägungen der Fahrleistung innerhalb der letzten 12 Monate	48
Bild A 7.5:	Individuelle Mediane der subjektiv empfundene Komplexität für jeden Probanden – gruppiert nach dem Anteil der Nachtfahrten innerhalb der letzten 12 Monate	51
Bild A 7.6:	Median, Minimum und Maximum für die drei Ausprägungen des Anteils der Nachtfahrten innerhalb der letzten 12 Monaten	52
Bild A7.7:	Subjektiv empfundene Komplexität (zentrale Tendenz) für jeden Probanden – Durchgang 1	55
Bild A7.8:	Subjektiv empfundene Komplexität (zentrale Tendenz) für jeden Probanden – Durchgang 2	55
Bild A7.9:	Subjektiv empfundene Komplexität (zentrale Tendenz) für jeden Probanden – Durchgang 3	56
Bild A7.10:	Subjektiv empfundene Komplexität (zentrale Tendenz) für jeden Probanden – Durchgang 4	56
Bild A 7.11:	Median, Minimum und Maximum für jede Wiederholung	57
Bild A7.12:	Subjektiv empfundene Komplexität (zentrale Tendenz) für jeden Probanden – Kategorie A	60
Bild A7.13:	Subjektiv empfundene Komplexität (zentrale Tendenz) für jeden Probanden – Kategorie B	61

Bild A7.14:	Subjektiv empfundene Komplexität (zentrale Tendenz) für jeden Probanden – Kategorie C	61
Bild A7.15:	Subjektiv empfundene Komplexität (zentrale Tendenz) für jeden Probanden – Kategorie D	62
Bild A8.1:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 7, Durchgang 2	63
Bild A8.2:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 7, Durchgang 2	63
Bild A8.3:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 7, Durchgang 3	64
Bild A8.4:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 7, Durchgang 3	64
Bild A8.5:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 7, Durchgang 4	65
Bild A8.6:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 7, Durchgang 4	65
Bild A8.7:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 17, Durchgang 2	66
Bild A8.8:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 17, Durchgang 2	66
Bild A8.9:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 17, Durchgang 3	67
Bild A8.10:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 17, Durchgang 3	67
Bild A8.11:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 17, Durchgang 4	68
Bild A8.12:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 17, Durchgang 4	68
Bild A8.13:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 18, Durchgang 2	69
Bild A8.14:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 18, Durchgang 2	69
Bild A8.15:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 18, Durchgang 3	70
Bild A8.16:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 18, Durchgang 3	70
Bild A8.17:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 18, Durchgang 4	71

Anhang

Bild A8.18:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 18, Durchgang 4	71
Bild A8.19:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 19, Durchgang 2	72
Bild A8.20:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 19, Durchgang 2	72
Bild A8.21:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 20, Durchgang 2	73
Bild A8.22:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 20, Durchgang 2	73
Bild A8.23:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 21, Durchgang 2	74
Bild A8.24:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 21, Durchgang 2	74
Bild A8.25:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 12, Durchgang 2	75
Bild A8.26:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 12, Durchgang 2	75
Bild A8.27:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 12, Durchgang 3	76
Bild A8.28:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 12, Durchgang 3	76
Bild A8.29:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 12, Durchgang 4	77
Bild A8.30:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 12, Durchgang 4	77
Bild A8.31:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 13, Durchgang 2	78
Bild A8.32:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 13, Durchgang 2	78
Bild A8.33:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 13, Durchgang 3	79
Bild A8.34:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 13, Durchgang 3	79
Bild A8.35:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 13, Durchgang 4	80
Bild A8.36:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 13, Durchgang 4	80
Bild A8.37:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 15, Durchgang 2	81

Anhang

Bild A8.38:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 15, Durchgang 2	81
Bild A8.39:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 15, Durchgang 3	82
Bild A8.40:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 15, Durchgang 3	82
Bild A8.41:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 15, Durchgang 4	83
Bild A8.42:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 15, Durchgang 4	83
Bild A8.43:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 16, Durchgang 2	84
Bild A8.44:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 16, Durchgang 2	84
Bild A8.45:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 16, Durchgang 3	85
Bild A8.46:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 16, Durchgang 3	85
Bild A8.47:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 16, Durchgang 4	86
Bild A8.48:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 16, Durchgang 4	86
Bild A8.49:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 22*, Durchgang 2	87
Bild A8.50:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 22*, Durchgang 2	87
Bild A8.51:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 23*, Durchgang 2	88
Bild A8.52:	Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 23*, Durchgang 2	88
Bild A9.1:	Darstellung des Zusammenhangs zwischen KX und KSE und der Regressionsgeraden der Altersgruppe jung	89
Bild A 9.2:	Darstellung des Zusammenhangs zwischen KX und KSE und der Regressionsgeraden der Altersgruppe mittel	89
Bild A10.1:	Szenario 15	101
Bild A10.2:	Szenario 17	101
Bild A10.3:	Szenario 71	102
Bild A10.4:	Szenario 79	103
Bild A10.5:	Szenario 87	103
		AV

Anhang

Tabellenverzeichnis

Tabelle A5.1:	Datenblatt zur Messung des Reflexionsgrades mit der Ulbrichtschen Kugel nach DIN 5036, Teil 3	37
Tabelle A5.2:	Der Nachweis der Wahrnehmbarkeit der Verkehrszeichen im Labor - Audi A5 (XE)	41
Tabelle A5.3:	Der Nachweis der Wahrnehmbarkeit der Verkehrszeichen im Labor - Audi A6 (XE)	41
Tabelle A6.1:	Fahrerdemographische Daten des „Stammkollektivs“	43
Tabelle A6.2:	Fahrerdemographische Daten der zusätzlichen fünf Probanden (UAI)	43
Tabelle A 7.1:	Verteilung der Probanden bezogen auf das Geschlecht	44
Tabelle A 7.2:	Ergebnis des Signifikanztests der Gleichheit der Mediane je Geschlecht	46
Tabelle A 7.3:	Verteilung der Probanden bezogen auf Fahrleistung (letzte 12 Monate)	47
Tabelle A 7.4:	Ergebnis des Signifikanztests der Gleichheit der Mediane je Fahrleistungsausprägung	49
Tabelle A 7.5:	Verteilung der Probanden bezogen auf den Anteil der Nachtfahrten (letzte 12 Monate)	50
Tabelle A 7.6:	Ergebnis des Signifikanztests der Gleichheit der Mediane je Ausprägung des Anteils der Nachtfahrten	53
Tabelle A 7.7:	Ergebnisse der paarweisen Vergleiche zwischen den Ausprägungen des Anteils der Nachtfahrten	53
Tabelle A 7.8:	Ergebnis des Signifikanztests der Gleichheit der Mediane je Untersuchungsdurchgang	58
Tabelle A 7.9:	Komplexität vs. Wiederholung – Ergebnisse der paarweisen Vergleiche zwischen den Ausprägungen	59
Tabelle A9.2:	Berechnungen zur Absicherung des Regressionskoeffizienten für das Modell der Altersgruppe mittel	91
Tabelle A9.3:	Berechnungen zur Absicherung des Regressionskoeffizienten für das Modell der Altersgruppe alt	92
Tabelle A9.4:	Bestimmung der Objekteigenschaften EO, der Objektkomplexitäten OK und der Komplexität des Szenarios K _x , Altersgruppe jung	93
Tabelle A9.5:	Bestimmung der Objekteigenschaften EO, der Objektkomplexitäten OK und der Komplexität des Szenarios K _x , Altersgruppe mittel	93
Tabelle A 10.1:	Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 85	94

Anhang

Tabelle A 10.2:	Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 8	94
Tabelle A 10.3:	Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 79	94
Tabelle A 10.4:	Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 15	95
Tabelle A 10.5:	Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 48	95
Tabelle A 10.6:	Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 98	95
Tabelle A 10.7:	Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 12	96
Tabelle A 10.8:	Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 87	96
Tabelle A 10.9:	Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 58	96
Tabelle A 10.10:	Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 54	97
Tabelle A 10.11:	Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 17	97
Tabelle A 10.12:	Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 16	98
Tabelle A 10.13:	Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 71	98
Tabelle A 10.14:	Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 92	99
Tabelle A 10.15:	Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 11	100
Tabelle A 10.16:	Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 44	100
Tabelle A10.17:	Differenzbeträge für alle 17 Szenarien, geordnet nach Komplexitätsbereich	104
Tabelle A10.18:	Differenzbeträge der Szenarien mit weniger als acht Objekten	104

A1 Das menschliche Auge

A1.1 Allgemeines

Aufgrund von Selbstleuchtung oder durch Reflexion von Lichtstrahlen wird ein Objekt für den Betrachter sichtbar. In Bild A1.1 ist der Querschnitt durch das menschliche Auge dargestellt. Als dioptrischer Apparat wird in diesem Zusammenhang der vordere Teil des Auges – Hornhaut, Pupille und Linse – bezeichnet. Dort wird das Licht gebrochen sowie fokussiert und auf die Netzhaut, den hinteren Teil des Auges gelenkt. Das auf der Netzhaut entstandene, auf dem Kopf stehende Bild besteht aus einer Vielzahl von „Lichtpunkten“. Infolge des Lichtreizes werden die Photorezeptoren der Netzhaut aktiviert. Sie wandeln die Lichtreize in elektrische Reize um, welche ein Netzwerk aus Bipolar-, Horizontal- und Amakrinzellen durchlaufen und schließlich zu den Ganglienzellen gelangen, welche den Sehnerv bilden und die Signale aus dem Auge an die entsprechenden Gehirnareale weiterleiten. ([METHLING und PESCHKE, 1987], [GOLDSTEIN, 2002])

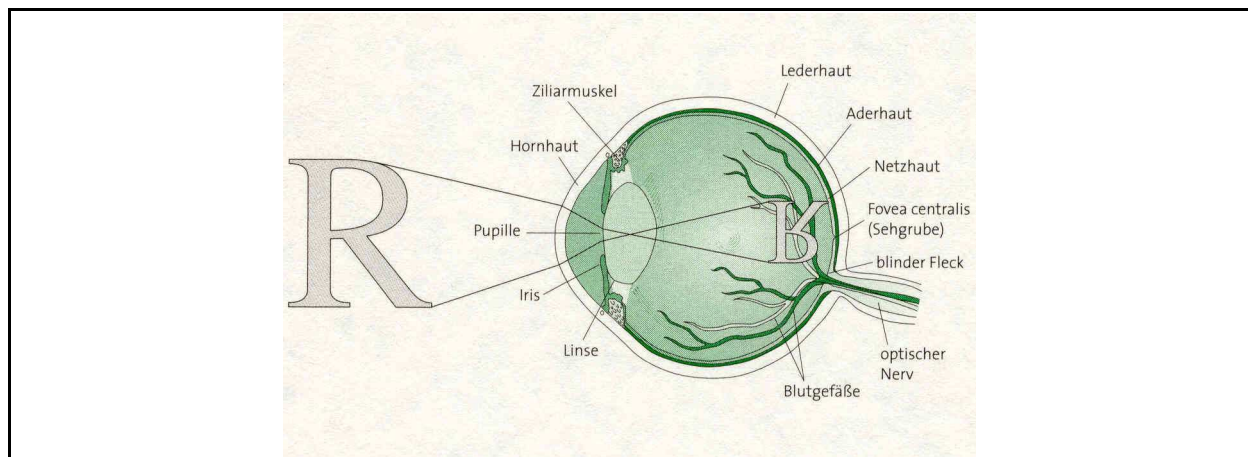


Bild A1.1: Querschnitt durch das menschliche Auge [GEGENFURTNER, 2003]

A1.2 Der vordere Teil des Auges

Die Eigenschaften des vorderen Teils des Auges sind mit denen einer Kamera vergleichbar. Beide besitzen optische Vorrichtungen zur Brechung des Lichts und können Abbilder der Umwelt erzeugen. Dennoch funktionieren beide sehr unterschiedlich. Die Kamera kann verschieden entfernte Objekte scharf abbilden, indem sie die Linse bewegt. Das menschliche Auge hingegen erreicht dies durch Verformung der Linse. Das erzeugte Abbild der Kamera kann auf Papier abgebildet werden. Das erzeugte Abbild des Auges wird auf der Netzhaut abgebildet, in elektrische Impulse umgewandelt, ins Gehirn weitergeleitet, verarbeitet und wahrgenommen. Dabei nimmt das Auge jedoch nicht nur ein Bild auf, sondern ganze Bildserien. [GOLDSTEIN, 2002]

Der Augapfel (lat. *Bulbus*) ist nahezu kugelförmig und hat einen Durchmesser von etwa 2,4 cm. Die horizontalen und vertikalen Bewegungen des Auges werden von sechs seitlich ansetzenden Muskeln ausgeführt. Am vorderen Teil des Augapfels befindet sich die Hornhaut (lat. *Cornea*). Sie bildet den Abschluss des Auges nach

Anhang

außen und ist fest sowie zäh. „Sie ist hochtransparent und stark lichtbrechend.“ Um ein Austrocknen zu verhindern sowie zur Verbesserung der optischen Eigenschaften wird die Hornhaut durch Tränenflüssigkeit angefeuchtet. [WELSCH und LIEBMANN, 2004]

Die Größe der Pupille wird von der Iris geregelt. Die Aufgabe der Iris ist mit der einer Blende eines Fotoapparates zu vergleichen. Sie reguliert die Menge an einfallendem Licht, indem sie sich verengt oder erweitert. Die Verengung wird über einen Ringmuskel erreicht, die Erweiterung über radial eingelagerte Muskelfasern. Fällt sehr viel Licht ins Auge ein, kann die Iris die Pupillenöffnung verkleinern (lat. *Miosis*). Herrscht jedoch Lichtmangel, so vergrößert die Iris die Pupille (lat. *Mydriasis*). Die Verkleinerung der Pupillenöffnung ist auch bei Betrachtung eines sehr nahen Gegenstandes zu beobachten. Die Färbung der Iris ist vererbt und hat keinerlei Einfluss auf die Eigenschaften des Sehens. [WELSCH und LIEBMANN, 2004]

Die Linse ist die wichtigste Komponente des optischen Systems. Sie besteht aus einem transparenten Gewebe, welches eine sehr hohe Brechkraft besitzt. Sie ist in ihrer Form und damit auch ihrer Brechkraft variabel. Dadurch wird es möglich, nahe und weite Fixierpunkte scharf zu sehen. Diese Eigenschaft wird Akkommodation genannt. „In der Ruhestellung ist das Auge auf Fernsicht adaptiert.“ Dabei ist die Linse „durch Zug der radial ansetzenden Zonulafasern des Ziliarapparates“ im vorderen Teil abgeflacht und besitzt dem entsprechend auch eine geringe Brechkraft. [WELSCH und LIEBMANN, 2004] Um einen näheren Punkt scharf sehen zu können, muss die Linse stärker gekrümmt und damit die Brechkraft erhöht werden. Ermöglicht wird dies durch den ringförmigen Ziliarmuskel, der dem Zug der Zonulafasern entgegenwirkt. Aufgrund ihrer Elastizität kann sich die Linse so stärker krümmen. Mit zunehmendem Alter nimmt die Elastizität der Linse jedoch ab. Da das Auge nicht mehr genügend gewölbt werden kann, tritt die so genannte Altersweitsichtigkeit auf; sehr nahe Objekte können nicht mehr scharf abgebildet werden. [WELSCH und LIEBMANN, 2004]

A1.3 Der hintere Teil des Auges

A1.3.1 Aufbau der Netzhaut

Der hintere Teil der Augeninnenfläche wird vollständig von der Netzhaut (lat. *Retina*) ausgekleidet. Die Netzhaut ist eine Schicht aus fünf Arten von Neuronen. Der Aufbau der Netzhaut ist seitenverkehrt, die lichtempfindlichen Photorezeptoren (Stäbchen und Zapfen) liegen auf der lichtabgewandten Seite. Das Licht muss somit erst durch die lichtdurchlässigen Netzhautneuronen (Horizontal-, Bipolar-, Amakrin- und Ganglienzellen) hindurch, um zu den Photorezeptoren zu gelangen. In Bild A1.2 ist der Querschnitt durch die Netzhaut dargestellt. Die Netzhautneuronen verarbeiten die empfangenen Impulse und leiten sie weiter. Von den Ganglienzellen existieren zwei verschiedene Arten; große (M-Ganglienzelle) und kleine (P-Ganglienzelle), welche für die Wahrnehmung unterschiedlicher visueller Merkmale zuständig sind. Die Impulse verlassen über die Ganglienzellenfasern, welche den Sehnerv (lat. *Nervus opticus*) bilden, das Auge und werden zu den entsprechenden Hirnarealen weitergeleitet. [GOLDSTEIN, 2002]

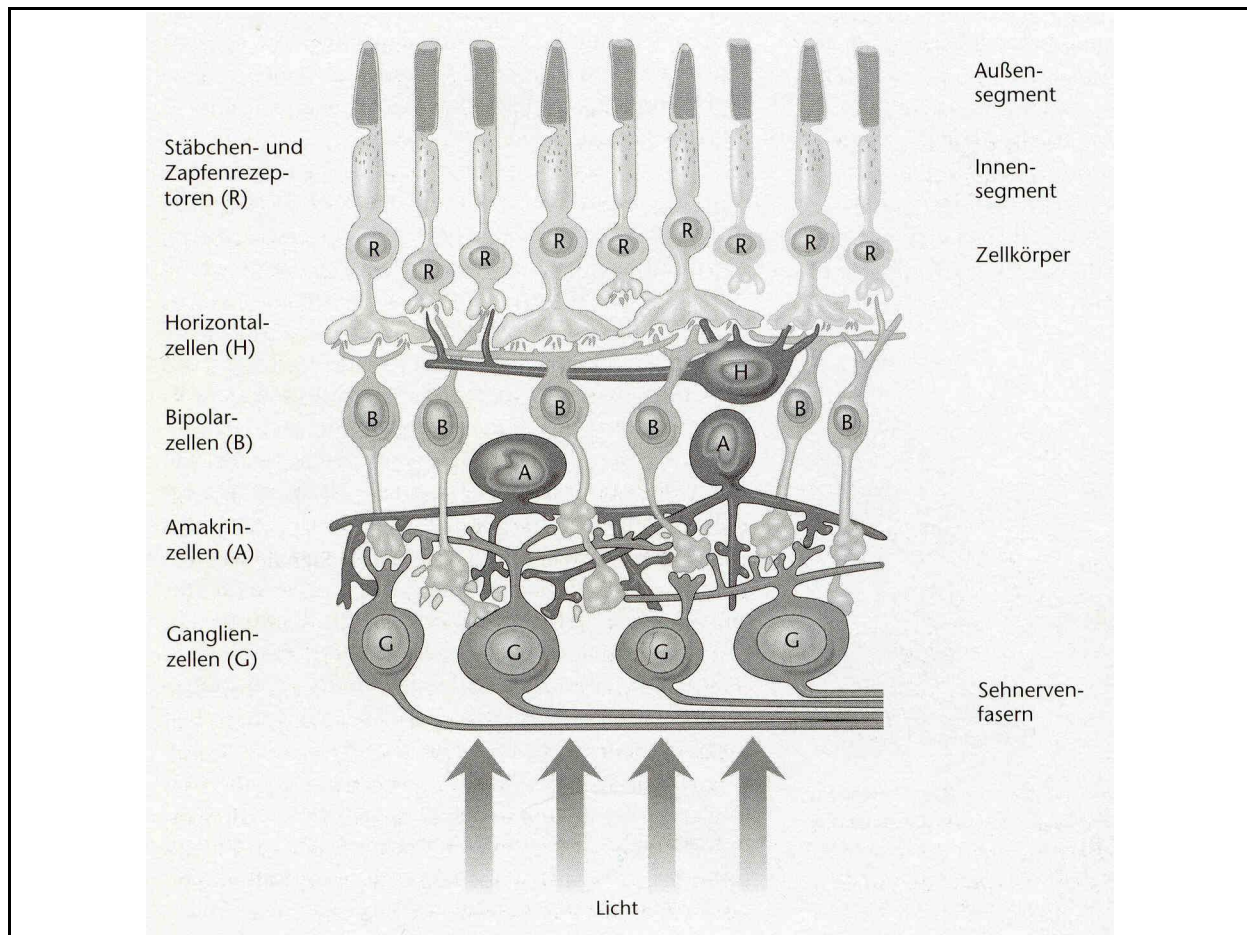


Bild A1.2: Querschnitt durch die Netzhaut des Auges [GOLDSTEIN, 2002]

A1.3.2 Die Photorezeptoren und ihre Funktionsweise

Auf der menschlichen Netzhaut befinden sich etwa 120 Millionen Stäbchen und etwa sechs Millionen Zapfen. Die Verteilung der Photorezeptoren auf der Netzhaut ist in Bild A1.3 dargestellt. Im fovealen Bereich (2°) ist zum Einen die Dichte der Photorezeptoren am höchsten, sie nimmt zur Peripherie hin jedoch ab. [WELSCH und LIEBMANN, 2004] Zum Anderen sind dort nur Zapfen angeordnet. Nur an dieser Stelle ist Scharfsehen möglich. In der Peripherie der Fovea nimmt der Anteil der Stäbchen drastisch zu, sie sind damit den Zapfen mengenmäßig überlegen. An der Stelle, wo der Sehnerv aus dem Auge heraustritt, sind keine Photorezeptoren angeordnet. Informationen, die auf diese Stelle der Netzhaut fallen, werden nicht gesehen. Diese Stelle wird daher auch blinder Fleck genannt. Im Normalfall sieht der Mensch mit zwei Augen, beide Bilder werden überlagert und zu einem Bild zusammengefasst. Daher fällt der blinde Fleck dem Menschen nicht auf. [GOLDSTEIN, 2002]

Anhang

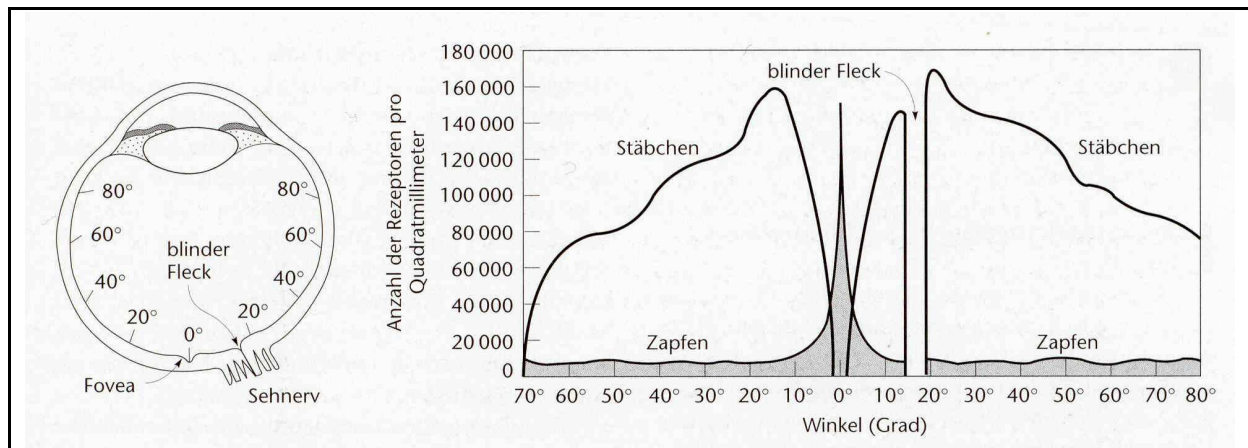


Bild A1.3: Verteilung der Photorezeptoren auf der Netzhaut [GOLDSTEIN, 2002]

Stäbchen und Zapfen haben ihren Namen aufgrund der Form erhalten. Bereits im Jahre 1865 entdeckte Max Schultze, dass die Stäbchen lang und stabförmig und die Zapfen kürzer und kegelförmig sind. Die „Einsatzbereiche“ der Photorezeptoren (vgl. Kapitel A1.5) ist unterschiedlich. Mit den Stäbchen ist das Sehen bei Dämmerung sowie bei Nacht möglich. Sie reagieren auf Helligkeit jedoch nicht auf Farben. Die Zapfen hingegen sind bei Dunkelheit inaktiv. Erst bei hoher Lichtintensität werden sie aktiv und ermöglichen somit das Sehen von Farben. [METHLING und PESCHKE, 1987]

Der Mensch besitzt drei verschiedene Arten von Zapfen, eingeteilt nach „dem Spektralbereich ihrer höchsten Empfindlichkeit“. [KARNATH und THIER, 2003] Es handelt sich dabei um lang-, mittel- und kurzwellensensitive Zapfen, welche fälschlicherweise oft Rot-, Grün- und Blauzapfen genannt werden. Die drei Zapfenarten sind nach dem Verhältnis $L : M : S = 34 : 17 : 1$ auf der menschlichen Netzhaut verteilt, wobei die Verteilung der individuell ist. In Bild A1.4 sind die spektralen Absorptionskurven der drei menschlichen Zapfen dargestellt. Die spektralen Absorptionskurven der „Rot-“ und „Grünzapfen“ sind sehr ähnlich, deren Maxima liegen nahe beieinander im Wellenlängenbereich von 533 und 564 nm. Begründet wird dies damit, dass beide Zapfen aus einem Urzapfen entstanden sind. Die spektrale Absorptionskurve der „Blauzapfen“ hingegen hat ihr Maximum im Wellenlängenbereich von 437nm. ([KARNATH und THIER, 2003], [KHANH, 2006])

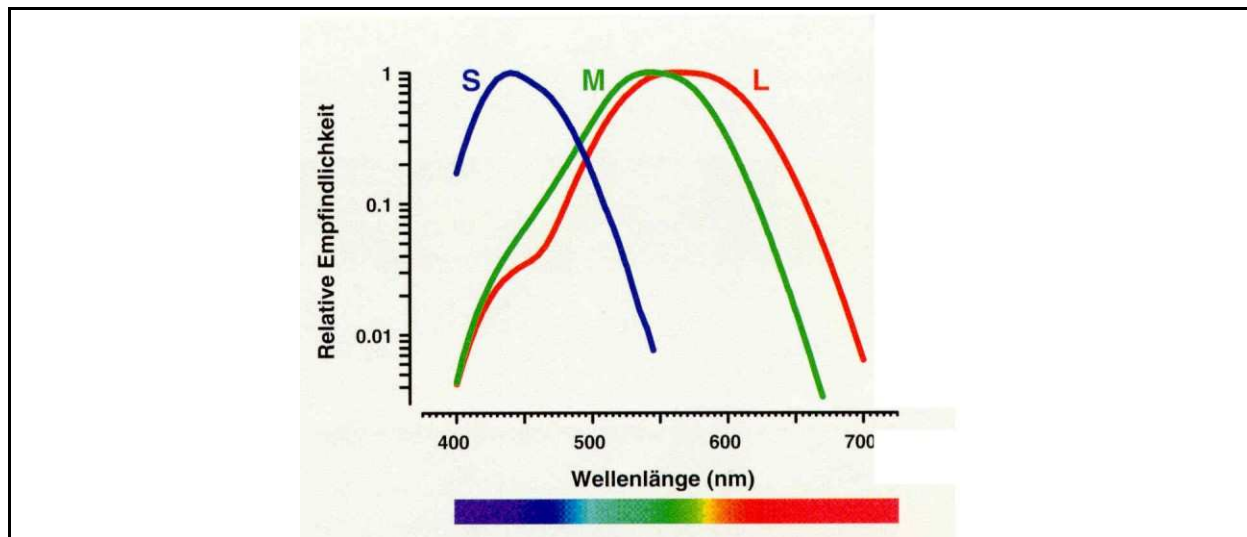


Bild A1.4: Spektrale Absorptionskurven der menschlichen Rot-, Grün- und Blauzapfen [KARNATH und THIER, 2003]

Die Photorezeptoren wandeln das auf der Netzhaut auftreffende Licht in elektrische Impulse um. In der Membran der Photorezeptoren befindet sich ein Sehpigmentmolekül. Der größere Teil des Moleküls, das Protein, wird Opsin genannt. Am Opsin hängt ein kleineres, lichtempfindliches Molekül, das Retinal¹, welches auf Lichtreize reagiert. Die Folge ist eine Veränderung der Form des Moleküls, wodurch eine chemische Kettenreaktion ausgelöst wird. Es entsteht ein Generatorpotential, wodurch sich die Durchlässigkeit der Sehzellenmembran ändert. Es können Ionen durch die Membran wandern. Die Folge ist ein kurzzeitiges umgekehrtes Potential, das so genannte Aktionspotential. Über das Axon der Sehzellen wird dieses Potential zu den Bipolarzellen weitergeleitet. Danach stellt sich der Ruhezustand wieder ein. „Je stärker der Lichtreiz war, um so höher das Generatorpotential, und um so mehr Aktionspotentiale werden in der Zeiteinheit erzeugt und über das Axon fortgeleitet (Impulsfolge)“. [GOLDSTEIN, 2002] Die Bipolarzellen übertragen die Signale der Photorezeptoren an die Ganglienzellen. Die Horizontal- und Amakrinzellen stellen Verbindungen zwischen den einzelnen Photorezeptoren sowie zwischen den Bipolarzellen dar. Die Folge ist eine sehr komplexe Verschaltung zwischen den Zellen. ([METHLING und PESCHKE, 1987], [GOLDSTEIN, 2002], [WELSCH und LIEBMANN, 2004])

A1.3.3 Die neuronale Verschaltung

Im Sehnerv, der aus den Ganglienzellen gebildet wird, sind eine Millionen Zellen vorhanden. Jede Ganglienzelle erhält die Signale von ca. 120 Stäbchen und von ca. sechs Zapfen. In der Fovea, dem Bereich des schärfsten Sehens, gibt es so genannte „Exklusivleitungen“. Jede Ganglienzelle erhält dort die Signale von nur einem

¹ Das Retinal der drei Arten von Zapfen ist identisch, jedoch unterscheidet sich die Abfolge der Aminosäuren des Proteins Opsin. Daher besitzen die drei Arten von Zapfen auch unterschiedliche Absorptionsspektren. [GOLDSTEIN, 2002]

Anhang

Zapfen. Mit dieser Art der Verschaltung lassen sich zwei Phänomene des menschlichen Sehens erklären. [GOLDSTEIN, 2002]

Schwache Lichtpunkte sind mit dem peripheren Sehen eher wahrzunehmen als mit dem fovealen Sehen.

Erklärung: Es wird angenommen, dass die Ganglienzellen eine bestimmte Anzahl von Signalen erhalten müssen, bevor sie reagieren und somit das Signal weiterleiten können. Aufgrund der „Exklusivleitungen“ muss die Intensität des Lichtreizes im Bereich der Fovea also höher sein als in der Peripherie, bevor eine Ganglienzelle reagiert. [GOLDSTEIN, 2002]

Details, z.B. Gesichter, sind eher mit dem fovealen Sehen als mit dem peripheren Sehen wahrzunehmen.

Erklärung: Anhand eines Beispiels lässt sich dieses Phänomen am einfachsten erläutern. Zwei getrennte Lichtpunkte mit einem geringen Abstand werden in der Peripherie als ein Lichtpunkt und in der Fovea als zwei Lichtpunkte wahrgenommen. Auch hier ist der Grund die besondere Art der neuronalen Verschaltung. Liegen die zwei Lichtpunkte so dicht beieinander, dass die beiden Stäbchen nur eine Ganglienzelle anregen, so wird auch nur ein Lichtpunkt wahrgenommen. Aufgrund der „Exklusivleitungen“ der Zapfen in der Fovea sowie der dichteren Verteilung der Rezeptoren werden zwei Ganglienzellen angeregt und somit auch zwei Lichtpunkte wahrgenommen. [GOLDSTEIN, 2002]

A1.4 Die Farbwahrnehmung

A1.4.1 Theorien

Bereits im 19. Jahrhundert wurde die Problematik der Farbwahrnehmung beschrieben. Auf der Basis psychophysischer Daten gingen die Drei-Farben-Theorie und die Gegenfarbentheorie hervor. Young und von Helmholtz formulierten zu Beginn des 19. Jahrhunderts die Dreifarben-theorie. Danach beruht das menschliche Farbsehen auf der Basis der drei Grundfarben Rot, Grün und Blau. Jede Farbe kann mittels additiver Farbmischung aus den drei Grundfarben erzeugt werden. Demnach ist die Farbwahrnehmung auf den drei unterschiedlichen Zapfenarten (kurzwellensensitiv, mittelwellensensitiv und langwellensensitiv) mit unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeiten begründet. Licht regt aufgrund seiner Wellenlänge diese Rezeptorsysteme in unterschiedlichen Maßen an, wodurch ein spezifisches Aktivitätsmuster entsteht, was wiederum zur Wahrnehmung einer Farbe führt. Somit wird jede Farbe (Wellenlänge) durch ein bestimmtes Aktivitätsmuster der drei Rezeptorsysteme repräsentiert. Diese Art der Codierung spricht für die Ensemblecodierung (Kapitel A2.6.2). ([GOLDSTEIN, 2002], [WELSCH und LIEBMANN, 2004])

In Bild A1.5 sind die Entladungsmuster der drei verschiedenen Zapfen auf unterschiedliche Farben (Wellenlängen) dargestellt. Die Farbe Rot wird beispielsweise durch eine sehr geringe Reaktion des K-Rezeptors, eine schwächere des M-Rezeptors und eine starke des L-Rezeptors repräsentiert. Die „Farbe“ Weiß hingegen erzeugt eine gleich starke Reaktion aller drei Rezeptoren.

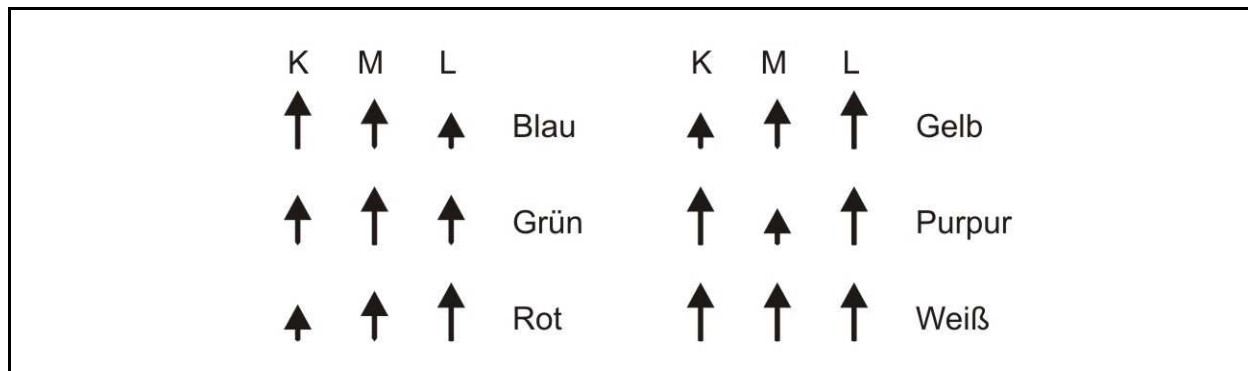


Bild A1.5: Entladungsmuster der drei Zapfenarten auf unterschiedliche Farben [GOLDSTEIN, 2002]

Ewald Hering formulierte zu Beginn des 19. Jahrhunderts eine weitere Theorie der Farbwahrnehmung, die auf dem menschlichen Farbempfindungen beruht. Demnach existieren vier physiologische Primärfarben; Blau Gelb, Rot und Grün. Die Farbe Gelb wird als Primärfarbe wahrgenommen, nicht als Mischfarbe. Aus diesen vier Farben werden die Gegenfarbenpaare (Gegenfarbenmechanismen) Blau-Gelb und Rot-Grün gebildet. Des Weiteren existiert noch ein drittes Gegenfarbenpaar, Schwarz-Weiß, welches der Erfassung der Helligkeit dient. In Bild A1.6 sind die drei Gegenfarbenmechanismen abgebildet. Demnach reagiert der erste Mechanismus (links im Bild) positiv auf weißes Licht (W) und negativ auf das Fehlen von Licht (S). Der zweite Mechanismus (Mitte im Bild) reagiert positiv auf rotes Licht (R), negativ auf Grünes Licht (GR). Der dritte Mechanismus (rechts im Bild) reagiert positiv auf gelbes Licht (G) und negativ auf blaues Licht (B). Diese positiven und negativen Reizantworten entsprechen dem Auf- und Abbau chemischer Substanzen in der Netzhaut. Auf der Grundlage späterer Forschungsarbeiten wurde diese Behauptung teilweise widerlegt. Es konnte jedoch herausgefunden werden, dass die verschiedenen Farben neurophysiologisch entgegen gesetzte Reaktionen hervorrufen. [GOLDSTEIN, 2002]

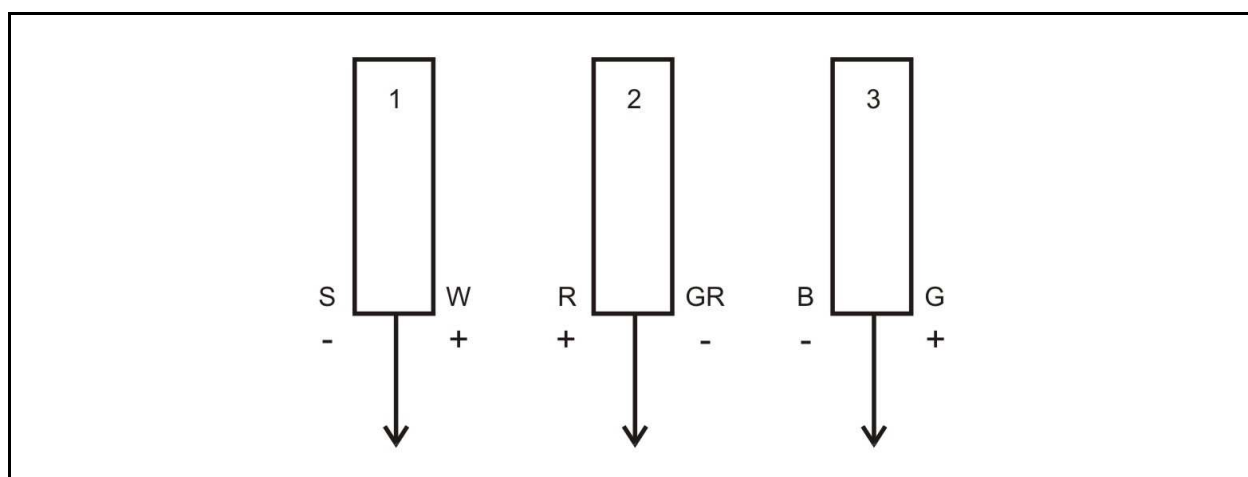


Bild A1.6: Darstellung der drei Gegenfarbenmechanismen [GOLDSTEIN, 2002]

Anhang

A1.4.2 Die Farbcodierung in der Netzhaut

Infolge späterer neurophysiologischer Untersuchungen konnten diese Theorien zum Einen bestätigt werden, zum Anderen konnte deren gemeinsames Handeln an der Farbwahrnehmung nachgewiesen werden.

Bei der Farbcodierung in der Netzhaut werden die Informationen nach dem Grundprinzip der neuronalen Verschaltung in einem Schaltkreis zweistufig verarbeitet, vgl. Bild A1.7. Demnach reagieren zunächst die drei Rezeptoren (K-, M- und L-Zapfen) auf einen bestimmten Wellenbereich (Licht), indem sie unterschiedlich stark reagieren und somit ein bestimmtes Erregungsmuster erzeugen. Dieses Erregungsmuster verarbeitet die nachgeordneten Neuronen (Gegenfarbenneuronen). Dabei erhalten die Rot-Grün-Zellen die Antworten aus den M- und L-Zapfen, wobei die Antwort des M-Zapfens hemmend wirkt, die des L-Zapfens erregend. Die Blau-Gelb-Zellen erhalten die hemmende Antwort des K-Zapfens sowie die erregende Antwort der Zelle A, welche die Antworten der M- und L-Zapfen zusammenfasst. Die erregenden bzw. hemmenden Antworten der Zapfen und der Zelle A werden in den Gegenfarbenneuronen subtrahiert. Als Ergebnis entsteht eine Gegenfarbenantwort, welche die Information über die Wellenlänge im Reizmuster klarer übermittelt. Ob diese Vorstellung allerdings zutrifft, ist noch nicht vollständig erforscht. Es ist aber sicher, dass die Gegenfarbenneuronen die Antworten der Rezeptoren in eine einfachere Form umwandeln. [GOLDSTEIN, 2002]

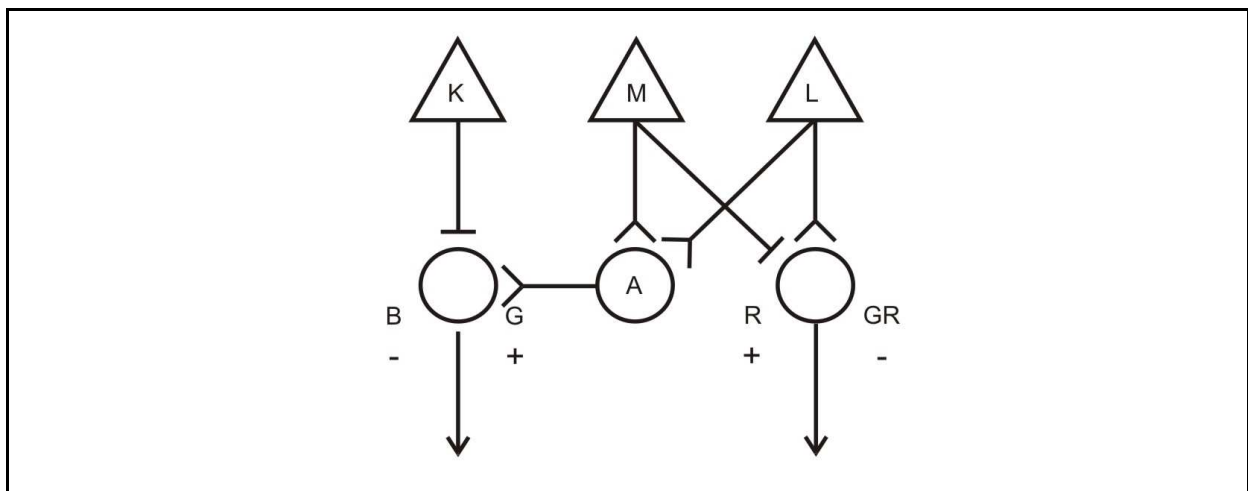


Bild A1.7: Schema eines neuronalen Schaltkreises [GOLDSTEIN, 2002]

A1.5 Adaptationszustände

Unter Adaptation wird die Anpassung eines Sinnessystems an die vorherrschenden Umgebungsbedingungen verstanden. [GEGENFURTNER, 2003]

Die Adaptation der Augen wird in die drei verschiedene Zustände photopisch, mesopisch und skotopisch unterschieden. Der photopische Adaptationszustand beschreibt das Sehen bei Tageslicht. Dabei sind alle Zapfen der Netzhaut aktiv, wodurch die Wahrnehmung von Farben möglich ist. Das mesopische Sehen hingegen beschreibt das Sehen bei Dämmerung. Dabei sind sowohl die Stäbchen als auch die Zapfen am Sehprozess beteiligt. Die Erkennung von Farben ist

eingeschränkt. Zwischen Stäbchen und Zapfen herrscht eine Art Konkurrenz, wodurch das Erkennen verschiedener Objekte erschwert wird. Im skotopischen Adaptationszustand ist das Auge dunkel adaptiert. Nur die Stäbchen sind aktiv. Daher können keine Farben wahrgenommen werden. [METHLING und PESCHKE, 1987]

Die Adaptationszeit ist die Zeit, die das Auge benötigt, um sich an das geänderte Leuchtdichteniveau anzupassen. Sie ist abhängig von der Leuchtdichtedifferenz sowie der Richtung des Wechsels. Für die Adaptation von Dunkel nach Hell werden in der Literatur Zeitdauern von drei bis sechs Minuten angegeben. Dabei wird bereits in den ersten 0,05 Sekunden die Blendempfindlichkeit auf 20 % gesenkt (α -Adaptation). Für den Wechsel von Hell nach Dunkel wird für die vollständige Adaptation eine Zeitdauer von 30 bis 60 Minuten genannt. Bereits nach circa fünf Minuten ist die Orientierung im Dunkeln wieder möglich. Durch die so genannte α -Adaptation werden kurzzeitige Blendungen als weniger störend empfunden. Dadurch wird das Fahren bei Dunkelheit mit starkem Gegenverkehr erst möglich. ([GRAMBERG-DANIELSEN ET. AL., 1984], [METHLING und PESCHKE, 1987])

Anhang

A2 Aufbau der Hirnareale und Verarbeitung der Signale

A2.1 Allgemeines

Mit den Augen werden die visuellen Informationen aufgenommen und in neuronale Signale umgewandelt. Über den Sehnerv (lat. *Nervus opticus*), der die Verbindung zwischen Auge und Gehirn darstellt, werden diese Signale ins Gehirn weitergeleitet. Im Chiasma opticum werden die Sehnerven gekreuzt. Danach gelangen die Informationen über den Sehstrang (lat. *Tractus opticus*) in den äußeren Kniehöcker (lat. *Corpus geniculatum laterale*). Dort werden die Neuronen erstmals verschaltet. Die Signale verlassen das CGL (Corpus geniculatum laterale) und gelangen erst zum primären visuellen Cortex, danach zum extrastriären Cortex.

A2.2 Chiasma opticum

Bei der Sehbahnkreuzung (lat. *Chiasma opticum*) werden keine Informationen verschaltet oder verarbeitet sondern die Fasern der Sehnerven beider Augen gekreuzt. Wie in Bild A2.1 zu sehen, werden dabei nur die Fasern überkreuzt, die aus dem nasalen (der Nase zugewandeten) Bereich der Retina stammen, also die blauen Fasern des linken Auges und die roten Fasern des rechten Auges. Die temporalen Fasern werden nicht gekreuzt. Hinter dem Chiasma opticum werden die Fasern (beide roten bzw. beide blauen Fasern) wieder zu einem Bündel zusammen gefasst. Dieses Bündel an Fasern wird als Sehstrang bezeichnet. Die Kreuzung der Fasern ist wichtig für die weitere Verarbeitung der Bilder und insbesondere für die Wahrnehmung der Tiefe. [WELSCH und LIEBMANN, 2004]

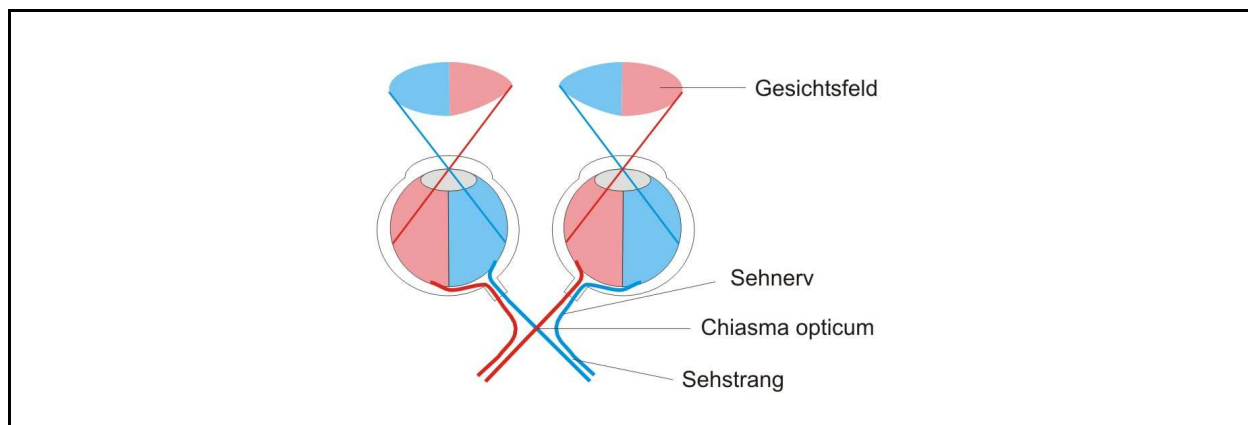


Bild A2.1: Beschreibung des Chiasma opticum [WELSCH und LIEBMANN, 2004]

A2.3 Corpus geniculatum laterale

A2.3.1 Allgemeines

Das CGL befindet sich zwischen dem Chiasma opticum und dem primären visuellen Cortex. An diesem Ort werden die Ganglienzellen der Retina erstmals über Synapsen verschaltet. Wie viele andere Wahrnehmungssysteme, ist auch das CGL paarig angelegt.

Das CGL ist in Bild A2.2 schematisch dargestellt. Es ist aus sechs übereinander liegenden Zellkörperschichten aufgebaut, wobei jede Schicht die Signale von nur einem Auge erhält. Das CGL ist nach zwei verschiedenen Aspekten organisiert; erstens nach den Augen und zweitens nach den Ganglienzelltypen. Die Schichten 2, 3 und 5 (grün) nehmen die Signale des ipsilateralen Auges auf, welches sich auf derselben Körperseite befindet wie das CGL. Die Schichten 1, 4 und 6 (orange) nehmen die Signale des kontralateralen Auges auf, welches sich auf der gegenüberliegenden Körperseite befindet. Die zwei inneren Schichten (gemustert) werden als magnozellular bezeichnet, die vier äußeren Schichten (vollflächig) als parvozellulär. Die Zellen der magnozellulären Schichten erhalten Signale der M-Ganglienzellen der Netzhaut und sind für die Wahrnehmung der Bewegung zuständig. Die Zellen der parvozellulären Schichten erhalten Signale der P-Ganglienzellen der Netzhaut und sind für die Wahrnehmung von Farbe, Textur, Muster und räumliche Tiefe verantwortlich. [GOLDSTEIN, 2002]

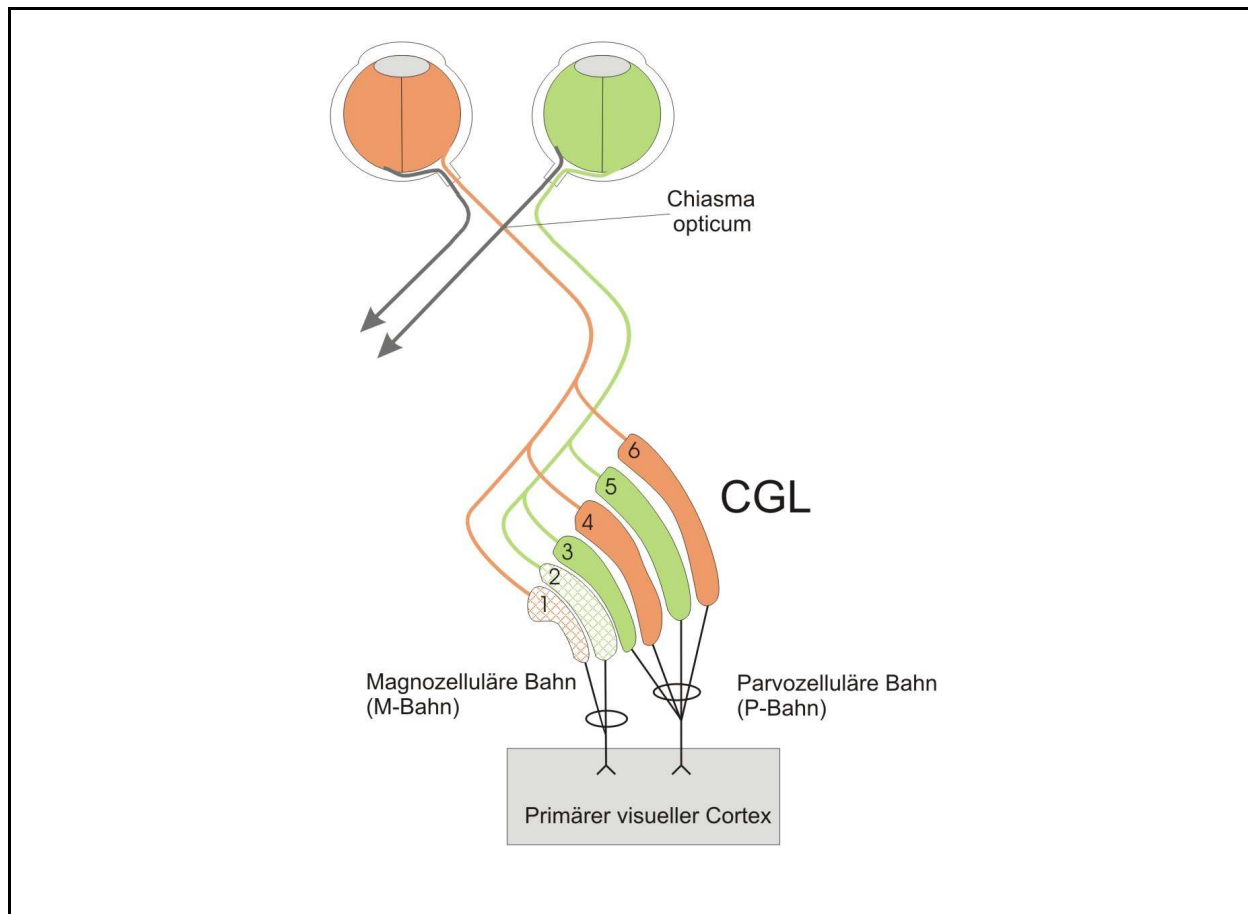


Bild A2.2: Schematischer Aufbau des CGL [GOLDSTEIN, 2002]

A2.3.2 Die Informationsverarbeitung

Im CGL werden nicht nur Informationen der Netzhaut verarbeitet, sondern auch Informationen aus der Sehrinde, vom Hirnstamm und von den Thalamuskernen. In Bild A2.3 ist der Informationsfluss in das CGL hinein und aus dem CGL heraus dargestellt. Anhand der Größe der Pfeile kann auf die Menge der Signale geschlossen werden. Es ist erkennbar, dass mehr Informationen in das CGL hineinströmen als

Anhang

wieder heraus. Die Informationen, die der Cortex vom CGL erhält, ist dabei sehr beschränkt. Im CGL werden die Nervenimpulse aus der Netzhaut reduziert und dann weiter an den Cortex gesendet. Anhand des großen Informationsflusses aus dem Cortex in das CGL ist ersichtlich, dass der Wahrnehmungsprozess nicht nur in einer Richtung stattfindet, sondern dass eine Interaktion zwischen den neuronalen Systemen besteht. Die Signale verlassen das Corpus geniculatum laterale und werden über die Sehstrahlung (lat. *Radiatio optica*) zum primären visuellen Cortex weitergeleitet. [GOLDSTEIN, 2002]

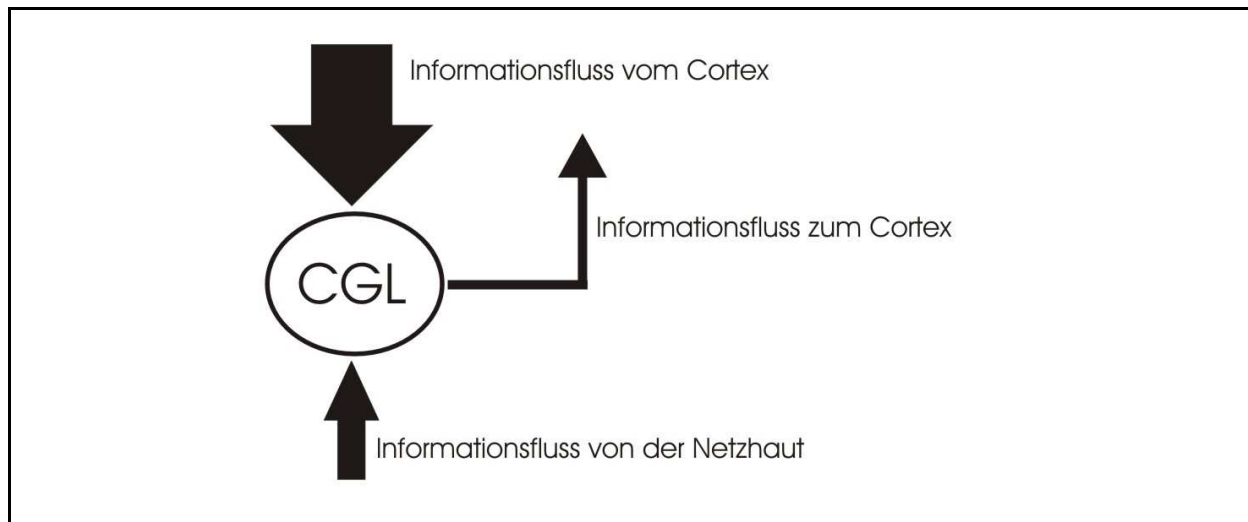


Bild A2.3: Einfließende und ausströmende Informationen des CGL [GOLDSTEIN, 2002]

A2.4 Primärer visueller Cortex

A2.4.1 Allgemeines

Der primäre visuelle Cortex, auch V1 genannt, umfasst ca. 250 Millionen Neuronen und ist somit komplexer als das vorgeschaltete CGL. Auch dieser Bereich des Gehirns ist in mehrere Schichten untergliedert. Die Fasern aus dem CGL sind mit der Schicht IV des primären visuellen Cortex verbunden. Aus dieser Schicht heraus werden die Signale an die darüber und darunter liegenden Schichten weitergeleitet.

Vor über 100 Jahren wurde der primäre visuelle Cortex entdeckt. Damals wurde vermutet, dass alle visuellen Prozesse in diesem Bereich ablaufen. Erst später stellte sich heraus, dass nur eine erste grobe Analyse dort stattfindet.

A2.4.2 Die Informationsverarbeitung

Das heutige Wissen über die Physiologie des Sehens wurde von Hubel und Wiesel bereits Anfang der 1950er Jahre erforscht. Für ihre Arbeiten in diesem Bereich erhielten sie im Jahre 1981 den Nobelpreis für Physiologie und Medizin. Sie erkannten, dass im primären visuellen Cortex die folgenden drei verschiedenen Arten von Neuronen vorkommen:

- Die einfachen Zellen des Cortex reagieren auf Lichtstreifen in bestimmte Richtungen. Dabei reagieren einige Zellen besonders gut auf senkrechte, andere auf waagerechte oder diagonale Lichtstreifen.

- Die komplexen Zellen des Cortex antworten wie die einfachen Zellen auf Lichtstreifen mit einer bestimmten Orientierung. Dabei müssen sich die Lichtstreifen jedoch bewegen. Wie bei den einfachen Zellen antworten viele komplexe Zellen, wenn sich der Lichtstreifen in eine bestimmte Richtung bewegt.
- Die endinhibitierten Zellen feuern, wenn sich Linien von bestimmter Länge oder Winkel oder Ecken in eine bestimmte Richtung bewegen. [GOLDSTEIN, 2002]

Mit den zuvor beschriebenen Neuronen kann im primären visuellen Cortex die einfache visuelle Struktur des Reizes analysiert werden, also Orientierung/Richtung, Ortsfrequenz und Länge. Bei der Entdeckung dieser drei Zellarten fanden Hubel und Wiesel auch heraus, dass der Cortex in so genannte Orientierungssäulen untergliedert ist. Jede dieser Säulen enthält alle drei Arten der oben genannten Zellen, die aber alle optimal auf eine bestimmte Reizorientierung antworten. Benachbarte Orientierungssäulen besitzen ähnliche, leicht unterschiedliche Orientierungen. [GOLDSTEIN, 2002]

Aus Untersuchungen konnten weitere wichtige Eigenschaften dieses Hirnareals erforscht werden. So wurde herausgefunden, dass die Auffälligkeit des Reizes einen Einfluss auf die Antwortrate der Neuronen hat. Liegt beispielsweise eine senkrechte Linie in einer großen Anzahl von Linien mit verschiedenen Orientierungen, so ist die Antwortrate auf diesen Reiz gering. Ist die senkrechte Linie jedoch von weiteren Linien mit der gleichen Orientierung umgeben, so ist die Antwortrate höher wie zuvor und gleich groß zur Antwortrate bei singulärer Darbietung. Bei paralleler Betrachtung der Reaktionszeit des Neurons wird deutlich, dass infolge geringer Auffälligkeit sich auch die Reaktionszeit verlängert. Des Weiteren wurde herausgefunden, dass in diesem Hirnareal die Zusammensetzung der aufgenommenen Wellenlängen bestimmt wird und bereits erste automatische Verrechnungen der Wellenlängendifferenzen stattfinden. Dabei besteht allerdings noch kein Bezug zu den Gegenständen. [GOLDSTEIN, 2002]

Anhand dieser Erkenntnisse konnte die Annahme, „dass das visuelle System eine komplexe Struktur mit Verarbeitung, Signalweiterleitung und mit Feedback-Bahnen ist“, bekräftigt werden. Denn nur so kann die Objekterkennung oder die Trennung von Figur und Grund erklärt werden. [GOLDSTEIN, 2002]

A2.5 Extrastriärer Cortex

A2.5.1 Allgemeines

Der extrastriäre Cortex umschließt den primären visuellen Cortex. „Er besteht aus Arealen im temporalen, parietalen und frontalen Cortex.“ In den 1990er Jahren wurde noch geglaubt, dass in diesem Bereich des menschlichen Gehirns höhere Prozessen, wie das visuelle Gedächtnis, ablaufen. [GOLDSTEIN, 2002]

A2.5.2 Die Informationsverarbeitung

Im extrastriären Cortex findet die Verarbeitung der eingegangenen Signale in zwei verschiedenen Bahnen statt. Bereits im Kapitel A2.3.1 wurde beschrieben, dass das CGL aus magno- und parvozellulären Schichten besteht. Im extrastriären Cortex gibt

Anhang

es zwei Bahnen, die diesen Schichten gleichen und die auch unterschiedliche Funktionen verrichten.

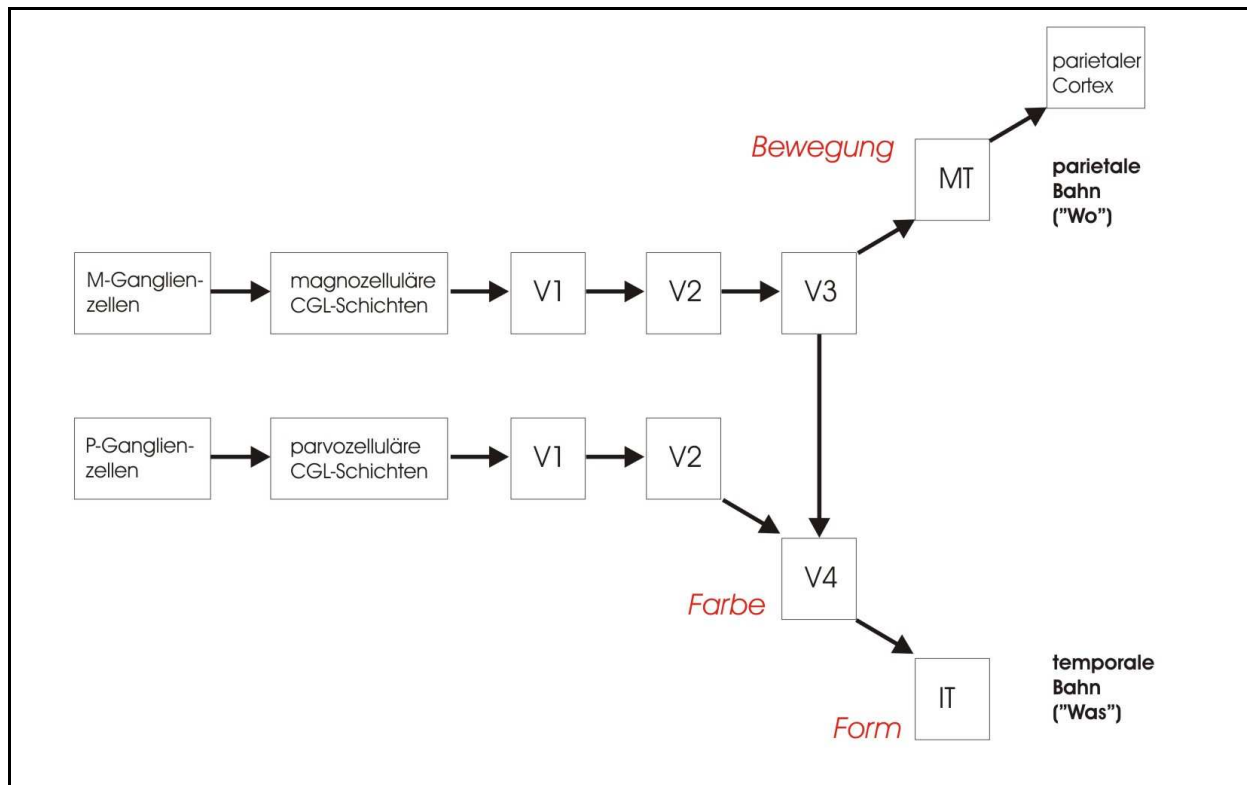


Bild A2.4: Vereinfachte Darstellung der beiden Verarbeitungsbahnen [GOLDSTEIN, 2002]

In Bild A2.4 sind diese zwei Bahnen der visuellen Informationsverarbeitung vom Ursprung bis zum „Ziel“ vereinfacht dargestellt. Als V1 wird wie bereits im Kapitel A2.4.1 beschrieben der primäre visuelle Cortex bezeichnet. V2, V3 und V4 stellen visuelle Areale des extrastriären Cortex dar. Dazu gehören auch der inferotemporale Cortex (IT), der mediotemporale Cortex (MT) sowie der parietale Cortex. Die so genannte „Wo“-Bahn ist für die Objektlokalisierung zuständig. Sie beginnt bei den retinalen M-Ganglienzellen geht in die magnozelluläre Schicht des CGL über und zieht bis in den Parietallappen. Die so genannte „Was“-Bahn ist für die Objekterkennung zuständig. Sie beginnt bei den retinalen P-Ganglienzellen geht in die parvozelluläre Schicht des CGL über und zieht bis in den Temporallappen. Die beiden Bahnen sind im Bild A2.4 als voneinander abgegrenzt dargestellt. Eine solche strikte Trennung besteht jedoch nicht. Es existieren viele anatomische Verbindungen zwischen den „Stationen“ der Informationsverarbeitung. Ein Beispiel ist das Areal V4 des extrastriären Cortex. Die Signale von beiden Schichten des CGL gelangen in dieses Areal. [GOLDSTEIN, 2002]

Im extrastriären Cortex wird „die aufgenommene Farbinformation mit Bezug auf die Umgebungsflächen und den Hintergrund ausgewertet.“ Es werden die Farbinformationen der einzelnen Oberflächen miteinander verglichen. Zunächst besteht allerdings noch kein Bezug zu den Gegenständen. Dieser wird in einem weiteren Verarbeitungsschritt, der sowohl im extrastriären Cortex als auch in höher gelegenen Arealen (*Gyrus fusiformis*) stattfindet, hergestellt.

A2.6 Die Verknüpfung cortikaler Signale

A2.6.1 Allgemeines

Wird ein Gegenstand dargeboten, so wird dieser vom visuellen System in seine verschiedenen Merkmale „zerlegt“. Zerlegung bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Neuronen, welche auf verschiedene Merkmale ansprechen, zu feuern beginnen. Der Gegenstand wird jedoch als Ganzes wahrgenommen und nicht seine einzelnen Merkmale. Daher wird davon ausgegangen, dass die einzelnen cortikalen Signale wieder zu einer Einheit zusammengefasst und verknüpft werden.

Es wird angenommen, dass die aus dem primären visuellen Cortex bekannte Orientierungssäulen miteinander verknüpft sind und somit auch kommunizieren können. Dabei stellt sich aber die Frage, welche Informationen von einer Orientierungssäule zur nächsten übertragen werden.

SINGER ET AL. (1993) (in [GOLDSTEIN, 2002]) haben die Hypothese entwickelt, dass die Objekte durch Neuronengruppen dargestellt werden. Dabei feuert eine Gruppe von Neuronen (Neuronen-Ensemble) abwechselnd stark und schwach. Die Folge ist eine oszillatorische Antwort und letztendlich eine Synchronisation. Wie diese Bindung jedoch tatsächlich stattfindet, darüber wird derzeit noch intensiv geforscht.

A2.6.2 Der sensorische Code

Der sensorische Code beschreibt, wie ein Gegenstand mithilfe von neuronalen Signalen repräsentiert wird. Dafür existieren zwei Theorien, die **Einzelzellencodierung** und die **Populationscodierung** (auch Ensemblecodierung). [GOLDSTEIN, 2002]

Bei der **Einzelzellencodierung** wird angenommen, dass es Neuronen gibt, die nur auf ein bestimmtes Reizmuster reagieren, beispielsweise auf einen Gegenstand oder ein Gesicht. Das würde bedeuten, dass für jedes Objekt ein Neuron existiert. Gegen diese Theorie spricht die Tatsache, dass wir eine große Anzahl von verschiedenen Gesichtern und Gegenständen wahrnehmen können. Außerdem kann mit dieser Theorie nicht erklärt werden, wie Gesichter und Gegenstände aus unterschiedlichen Entfernungen und Blickrichtungen erkannt werden. [GOLDSTEIN, 2002]

Bei der **Populationscodierung (Ensemblecodierung)** wird auf ein ganzes Netzwerk aus Neuronen zurückgegriffen, die für die Codierung eines Gegenstandes oder Gesichtes zuständig sind. Somit kann mit relativ wenigen Neuronen eine große Anzahl von Objekten signalisiert werden. Werden beispielsweise zwei Gesichter gezeigt, so reagieren die an der Gesichtserkennung beteiligten Neuronen ganz unterschiedlich darauf. Genauer gesagt feuern die Neuronen in unterschiedlicher Intensität, so können die zwei Gesichter erkannt und unterschieden werden. Des Weiteren ist der Mensch über die Populationscodierung in der Lage, Gesichter und Gegenstände auch aus unterschiedlichen Entfernungen und Blickrichtungen zu erkennen. Beteiligt daran sind die im IT-Areal (Formanalyse) existierenden Neuronen, die größen-invarianten Neuronen, die orts-invarianten Neuronen und die sichten-invarianten Neuronen. Sie erfüllen die folgenden Aufgaben:

Anhang

- größen-invariante Neuronen antworten, auch wenn sich der Gegenstand in unterschiedlichen Entfernungen befindet,
- orts-invariante Neuronen antworten, auch wenn sich der Gegenstand an unterschiedlichen Positionen befindet und
- sichten-invariante Neuronen antworten, unabhängig vom Blickwinkel. [GOLDSTEIN, 2002]

Neben diesen Neuronen existieren im IT-Areal noch weitere, so genannte spezifische Neuronen, welche sich in die drei Gruppen größenspezifisch, ortsspezifisch und sichtenspezifisch untergliedern. Sie erfüllen die folgenden Aufgaben:

- größenspezifische Neuronen antworten auf eine kleine Zahl von Objekten mit bestimmter Größe,
- ortsspezifische Neuronen antworten auf eine kleine Zahl von Objekten, die sich an einem bestimmten Ort befinden und
- sichtenspezifische Neuronen antworten auf eine kleine Zahl von Objekten, die sich in einem bestimmten Blickwinkel befinden. [GOLDSTEIN, 2002]

A3 Die Wahrnehmung von Objekten

A3.1 Allgemeines

Die Wahrnehmung von Objekten wird in erster Linie mit dem Erkennen der Objekte in Zusammenhang mit deren Funktion verstanden. Für die Wahrnehmung von Objekten liegen derzeit noch keine neuronalen Grundlagen vor. Alle in diesem Kapitel beschriebenen Erklärungen beruhen auf Annahmen von Wahrnehmungspsychologen, die zum Teil mithilfe neurologischer Grundlagen bereits begründet wurden. Als Literaturquelle für dieses Kapitel dient GOLDSTEIN (2002), in dem eine Einführung in die Wahrnehmungspsychologie gegeben wird und der international als Lehrbuch eingesetzt wird.

Zunächst wird kurz beschrieben, wie ein Objekt, in diesem Fall ein Reizmuster, in fünf Stufen analysiert wird, um das Objekt wahrzunehmen und zu erkennen. Danach werden einerseits die Erklärungsansätze der Gestaltpsychologie erläutert, andererseits werden vier neuere Beiträge zur Wahrnehmung von Objekten vorgestellt.

A3.2 Überblick

Für den Menschen ist es einfach, Objekte wahrzunehmen und zu identifizieren. Er ist in der Lage, ein zweidimensionales Bild in ein dreidimensionales Bild „umzuwandeln“. Des Weiteren kann er Objekte erkennen, auch wenn diese teilweise verdeckt sind. Diese Aufgaben „löst“ der Mensch auf „einfachste Weise“, es ist jedoch sehr schwierig bzw. kaum realisierbar, einem Computer das Sehen, ähnlich wie bei einem Menschen, beizubringen. Aber auch der Mensch hat Probleme mit der Wahrnehmung von Objekten, wenn die dargebotenen Reizmuster unklar oder auch mehrdeutig sind.

Das Wahrnehmen und Erkennen von Objekten ist ein sehr komplexer Vorgang. Um ein Objekt eindeutig wahrzunehmen, muss das visuelle System mehrere Probleme lösen. Das visuelle System muss zunächst das Muster des reflektierten Lichtes einer Szene/eines Objektes entschlüsseln. Dabei werden Bereiche mit „lokalen Merkmalen“ zu einer Einheit zusammengefasst und die Oberflächen sowie die zusammenhängenden Objekte der Umgebung rekonstruiert. Des Weiteren müssen spezielle Details sowie allgemeine Informationen verarbeitet werden, um die Szene/das Objekt zu erkennen und deren Beziehung zu den Gedächtnisinhalten sowie Handlungsmöglichkeiten herzustellen.

Nach TARR (2000), EDELMANN (1997), LITER und BÜLTHOFF (1998) (alle in [GOLDSTEIN, 2002]) lässt sich dieser Problemkomplex in die folgenden fünf Teile untergliedern:

1. „Erkennen kann auf unterschiedlichen Komplexitätsebenen erfolgen“

Das Erkennen von Objekten gestaltet sich sehr flexibel und ist auf die jeweiligen Erfordernisse abstimmbare. In Abhängigkeit von der Aufgabe werden Objekte als das erkannt, was sie sind.

2. „Merkmale und Merkmalskomplexe müssen in der Wahrnehmung zu Einheiten organisiert werden“

Anhang

Um etwas erkennen zu können, muss die Form eines Objektes wahrgenommen werden. Dazu ist es notwendig, dass Konturen, Ecken, Farben Texturen und Geometrien analysiert und schließlich zu Einheiten zusammengefügt werden.

3. „Objekte und Oberflächen müssen bei wechselnden Darbietungs- und Beobachtungsbedingungen zu Einheiten organisiert werden“

Objekte oder Oberflächen werden in der Realität meist durch Verdeckungen, Änderungen in der Beleuchtung, Sicht auf den Gegenstand, Lage oder Entfernung verändert vorgefunden. Aber auch in diesem Fall ist der Mensch in der Lage, das Objekt zu erkennen.

4. „Die Welt muss begrifflich geordnet werden“

Infolge einer Ordnung wird der Strom der Phänomene unterteilt, in Sprache fassbar und für das Handeln verfügbar. Durch die Gliederung in verschiedene Kategorien ist der Mensch in der Lage, Objekte auch sprachlich Kategorien zuzuordnen.

5. „Das Erkennen von Objekten ist eng mit Lernen verbunden“

Infolge von Lernprozessen können Objekte erkannt und voneinander unterschieden werden.

Die Interpretation eines Bildes kann mit den Begriffen Wahrnehmen, Wiedererkennen und Kategorisieren beschrieben werden. Die Begriffe sind theoretisch trennbar, bleiben jedoch im Wahrnehmungsprozess eng miteinander verbunden. Wahrnehmen bedeutet in diesem Zusammenhang das Erfassen der Form der Objekte, Wiedererkennen das Sich-Erinnern an etwas, das bereits früher gesehen oder von dem gehört wurde und Kategorisieren ist das Einsortieren in die bereits bestehende Ordnung.

A3.3 Erklärungsansätze der Objektwahrnehmung

A3.3.1 Allgemeines

In der Objektwahrnehmung existieren unterschiedliche Ansätze, die auf verschiedenen Sachverhalten beruhen. Mit Ausnahme der Gestaltpsychologie gehen alle Ansätze davon aus, dass ein Objekt zunächst in seine Elementarmerkmale zerlegt und schlussendlich wieder zu einem Ganzen zusammengesetzt wird. Die Objektwahrnehmung ist ein sehr komplexer Vorgang, der wahrscheinlich „mehrere unterschiedliche Mechanismen, die parallel in gegenseitiger Wechselwirkung und zueinander rückgekoppelt arbeiten“, beinhaltet.

Bei der Analyse eines Objekt gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten der „Verarbeitungsrichtung“. Wird das zu analysierende Objekt in seine Einzelteile zerlegt, so wird von *Bottom-up-Verarbeitung* gesprochen. Dabei werden im ersten Schritt die Elementarmerkmale des Objektes verarbeitet, welche die Grundlage der weiteren Wahrnehmung bilden. Werden Informationen bereits auf einer sehr hohen Ebene analysiert, wird von *Top-down-Verarbeitung* gesprochen. Dabei werden Bedeutung oder Vertrautheit des Objektes einbezogen.

A3.3.2 Die Gestaltpsychologie

Die klassische Assoziationspsychologie ging davon aus, dass sich Wahrnehmungen aus elementaren Empfindungen aufbauen. Demnach kann ein Gesicht nur durch die Zeichnung von Punkten dargestellt werden. Infolge der Addition der einzelnen Punkte (elementare Empfindungen) kann ein Gesicht wahrgenommen werden.

WERTHEIMER (1912) (in [GOLDSTEIN, 2002]), einer der Gründer der Gestaltpsychologie, führte Experimente durch und widerlegte die Vorstellung der Assoziationspsychologie. Die Gestaltpsychologen formulierten die folgende Grundregel: „Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile.“ Dabei wird die Wahrnehmung eines Teiles von den anderen Teilen beeinflusst. Damit konnten die Phänomene der Scheinbewegungen und der Scheinkonturen erklärt werden. Des Weiteren war die Fähigkeit, der Figur-GrundTrennung für die Gestaltpsychologen von großer Bedeutung. Diese Fähigkeit ist für die Wahrnehmung von Objekten ebenso entscheidend, wie die Auswertung der Schattenbildung.

A3.3.2.1 Die Gestaltfaktoren

Die Gestaltpsychologen formulierten sechs Regeln, nach denen der Mensch die einzelnen Teile zu einem Ganzen zusammenfügen. In der Fachliteratur werden sie auch Gestaltfaktoren oder Gestaltgesetze genannt.

1. Faktor der Prägnanz / der guten Gestalt / der Einfachheit

„Jedes Reizmuster wird so gesehen, dass die resultierende Struktur so einfach wie möglich ist.“

In Bild A3.1, a) ist eine Figur dargestellt, die der Erläuterung des Faktors der Prägnanz dient. Es besteht die Möglichkeit, dass die Figur in die Bestandteile, wie in b), c) oder d) abgebildet, zerlegt wahrgenommen wird. Dem Faktor der Prägnanz zufolge wird die Figur jedoch so wahrgenommen, wie in b) dargestellt, da sie die einfachste Variante ist.

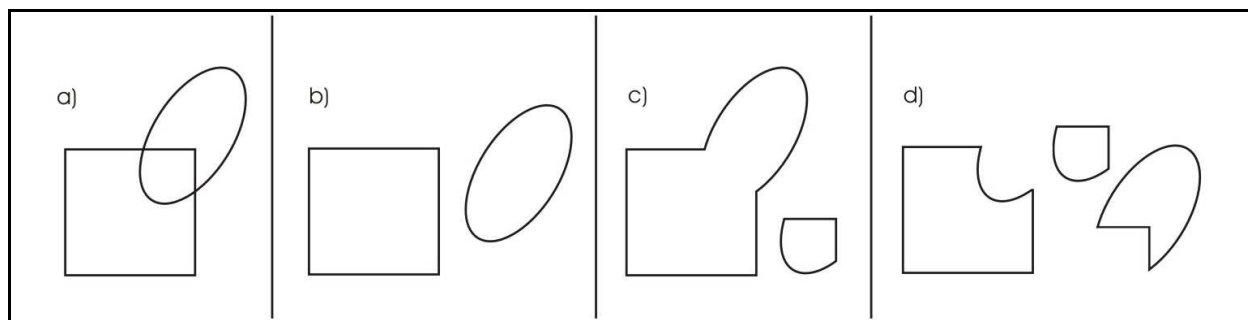


Bild A3.1: Beispiel für den Faktor der Prägnanz [GOLDSTEIN, 2002]

2. Faktor der Ähnlichkeit

„Ähnliche Dinge erscheinen zu zusammengehörenden Gruppen geordnet.“

In Bild A3.2 sind zwei Beispiele für diesen Gestaltfaktor gegeben. Im linken Bild (a) werden Zeilen (waagrecht) oder Spalten (senkrecht) aus Punkten wahrgenommen. Dagegen werden im rechten Bild (b) nur Spalten (senkrecht) wahrgenommen, da die Punkte und die Quadrate jeweils zu einer Gruppen zusammengefasst werden.

Anhang

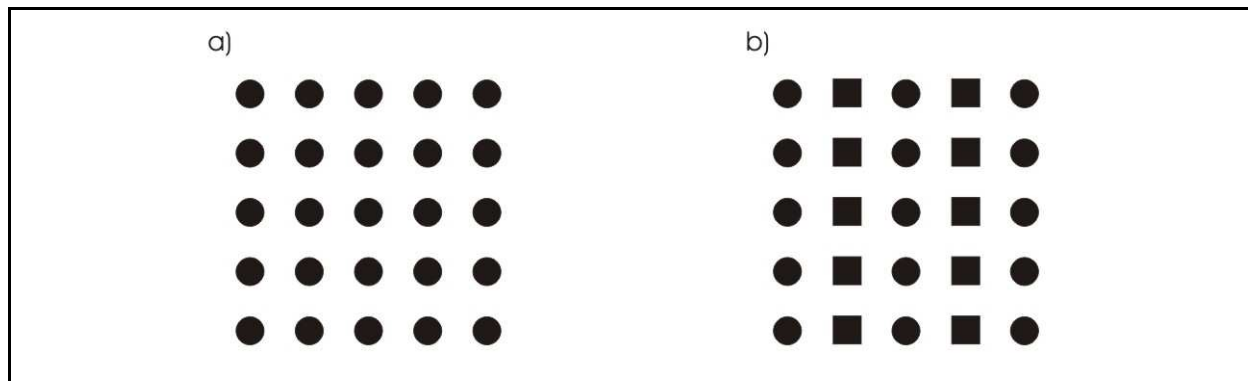


Bild A3.2: Beispiel für den Faktor der Ähnlichkeit [GOLDSTEIN, 2002]

3. Faktor der gestaltgerechten Linienfortsetzung

„Punkte, die als gerade oder sanft geschwungene Linien gesehen werden, wenn man sie verbindet, werden als zusammengehörig wahrgenommen. Linien werden tendenziell so gesehen, als folgten sie dem einfachsten Weg.“

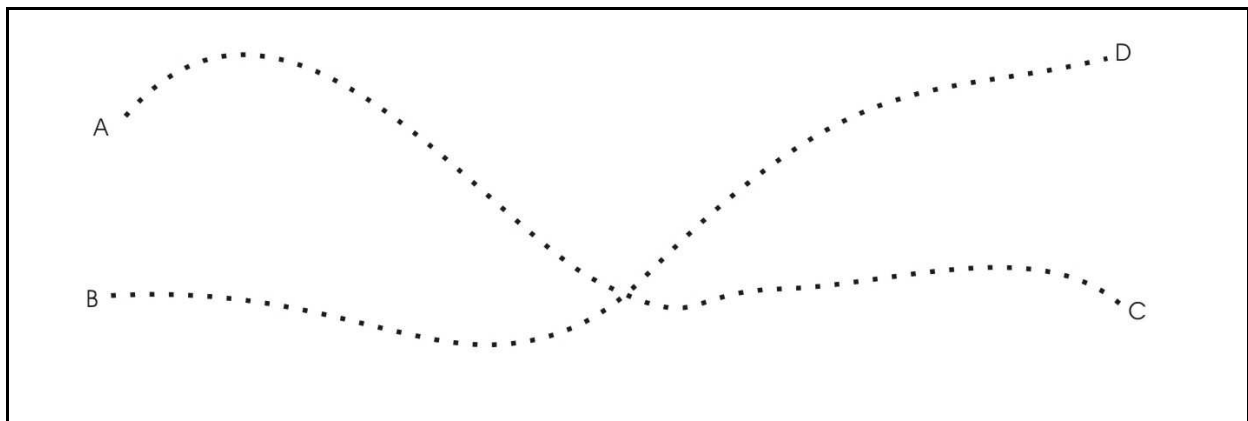


Bild A3.3: Beispiel für den Faktor der gestaltgerechten Linienfortsetzung [GOLDSTEIN, 2002]

In Bild A3.3 ist ein Beispiel für den Faktor der gestaltgerechten Linienfortsetzung zu sehen. Nach diesem Gestaltgesetz bilden die gepunkteten Linien eine Verbindung von A zu C bzw. von B zu D. Damit folgen die Linien dem einfachsten Weg, ohne extreme Richtungswechsel.

4. Faktor der Nähe

„Dinge, die sich nahe beieinander befinden, erscheinen als zusammengehörig.“

In Bild A3.4 sind zwei Beispiele für den Faktor der Nähe gegeben. Im linken Bild (a) werden nur Zeilen (waagrecht) aus Punkten wahrgenommen, da der waagerechte Abstand zwischen den Punkten geringer ist als der senkrechte Abstand. Auch im rechten Bild (b) werden nur Zeilen (waagrecht) wahrgenommen, obwohl Kreise und Quadrate gemischt in einer Zeile liegen. Erklärbar ist auch dies mit dem Faktor der Nähe. Die waagerechten Abstände zwischen den Punkten und Quadraten sind geringer als die senkrechten Abstände, daher werden die Elemente in waagerechter Richtung zu einer Gruppe zusammengefasst.

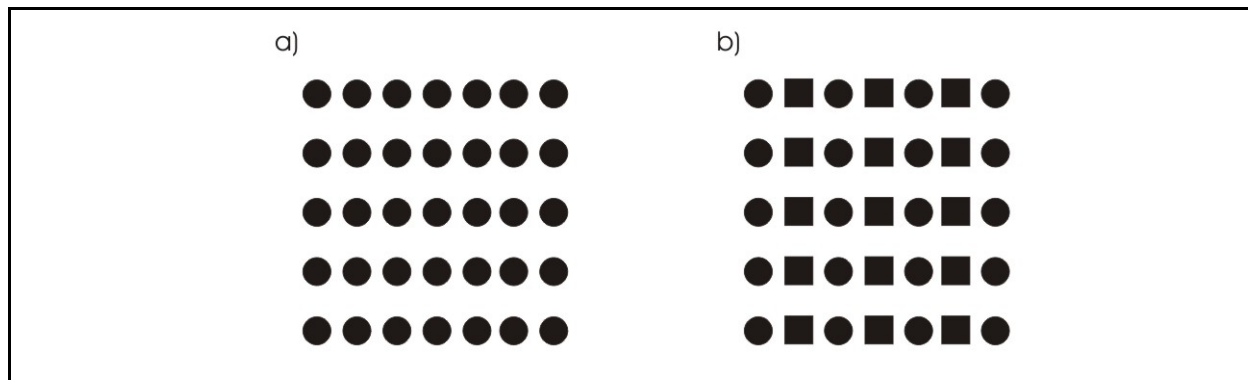


Bild A3.4: Beispiel für den Faktor der Nähe [GOLDSTEIN, 2002]

5. Faktor des gemeinsamen Schicksals

„Dinge die sich in die gleiche Richtung bewegen, erscheinen als zusammengehörig.“



Bild A3.5: Beispiel für den Faktor des gemeinsamen Schicksals

Die im Bild A3.5 dargestellten Personen sind nahe beieinander und bewegen sich alle in die gleiche Richtung, daher werden sie als Gruppe wahrgenommen.

6. Faktor der Bedeutung oder Vertrautheit

„Dinge bilden mit größerer Wahrscheinlichkeit Gruppen, wenn Gruppen vertraut erscheinen oder etwas bedeuten.“

Die in Bild A3.6 dargestellten Personen bilden eine Gruppe, da sie zum Einen die gleiche Kleidung tragen und zum anderen alle ein Blasinstrument in den Händen halten.

Anhang



Bild A3.6: Beispiel für den Faktor der Bedeutung

Die Gestaltfaktoren funktionieren jedoch nicht immer eindeutig, manchmal sind auch mehrere Wahrnehmungen möglich. Die Psychologen erklärten dies damit, dass das System komplexe Situationen löst, indem es so gut wie möglich schätzt. Aus diesem Grund wurden die Gestaltfaktoren/-gesetze auch eher als Heuristiken angewendet. Denn die Welt wird geordnet durch physikalische Kräfte, biologische Prozesse und durch Formen der sozialen Interaktion. Das System stützt sich bei der Auswertung also auf bestimmte Regelmäßigkeiten. Diese können im Laufe der Evolution entstanden sein, oder können aufgrund von Erfahrungen vorliegen, oder sind das Ergebnis des Lernens seit der frühesten Kindheit, oder sie sind eine Kombination aus Anpassung und Lernen.

Die Gestaltpsychologen konnten zu Beginn einige Frage noch nicht beantworten. Über die Entscheidungskriterien des Systems, welche Regel letztlich anzuwenden ist, liegen keine Ergebnisse vor. Um diese Frage beantworten zu können, werden weitere Untersuchungen in diesen Bereichen durchgeführt.

In den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts haben die Gestaltpsychologen Palmer und Rock die folgenden drei weiteren Faktoren formuliert, welche der Wahrnehmungsorganisation dienen.

7. Faktor der gemeinsamen Region

„Elemente, die innerhalb einer gemeinsamen Region liegen, werden zusammengruppiert.“

In Bild A3.7 ist im linken Bereich (a) des Bildes ein Beispiel für den Faktor der gemeinsamen Region gegeben. Infolge der Einrahmung der Punkte, werden diese als zusammengehörig wahrgenommen, obwohl der Abstand zwischen dem ersten und zweiten Punkt größer ist als zwischen dem zweiten und dritten.

8. Faktor der Verbundenheit der Elemente

„Elemente, die miteinander verbunden sind, werden als Einheit gesehen.“

Im mittleren Bereich (b) von Bild A3.7 wird gezeigt, dass infolge der Verbindung von Punkten diese als zusammengehörig gesehen werden. Auch in diesem Beispiel ist

der Abstand zwischen dem ersten und zweiten Punkt größer ist als zwischen dem zweiten und dritten.

9. Faktor der zeitlichen Synchronizität

„Leuchtpunkte, die gemeinsam aufleuchten, werden als eine Einheit erkannt.“

Ein Beispiel für diesen Faktor gibt der rechte Bereich (c) von Bild A3.7. Die Punkte die aufleuchten werden als eine Einheit wahrgenommen, obwohl deren Abstände sehr unterschiedlich sind. Ohne Beleuchtung würden sie keine Einheit bilden.

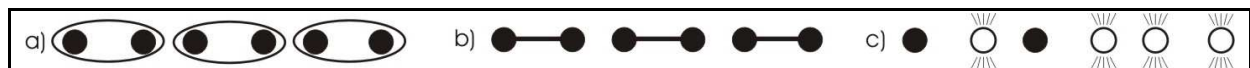


Bild A3.7: Beispiel für den Faktor der gemeinsamen Region, den Faktor der Verbundenheit der Elemente und den Faktor der zeitlichen Synchronizität [GOLDSTEIN, 2002]

A3.3.2.2 Die Figur-Grund-Trennung

Die Trennung der Figur vom Hintergrund ist die entscheidende Grundlage, um Objekte wahrnehmen zu können. Eine Figur wirkt dinghaft und steht vor dem Hintergrund. Der Hintergrund hingegen wirkt ungeformt, er ist nicht dinghaft. Diejenigen Konturen, welche die Figur vom Grund trennen werden als zugehörig zur Figur wahrgenommen. Die Faktoren, denen bei der Bestimmung von Figur und Hintergrund die größte Bedeutung zukommt, sind: Symmetrie, Größe, Orientierung und Bedeutung.

In zahlreichen Untersuchungen wurden diese Faktoren erforscht. Beispielweise werden symmetrisch geformte Bereiche als Figur gesehen, ebenso konvexe (nach außen gewölbte). Dabei werden konvexe Figuren eher als solche erkannt, als die symmetrisch geformte Figuren. Reizmuster, deren Flächen eher klein sind, werden eher als Figur erkannt. Ebenso werden vertikale und horizontale Flächen eher als Figur wahrgenommen als anders orientierte.

A3.3.3 Der Algorithmische Ansatz

Der Hauptvertreter dieses Erklärungsansatzes ist MARR (1982) (in [GOLDSTEIN, 2002]). Er versuchte das damalige Wissen aus der Computerwissenschaft auf die Wahrnehmungspsychologie zu übertragen. Dazu entwickelte er ein Modell, welches die einzelnen Verarbeitungsstufen in der Objektwahrnehmung widerspiegelt. Demnach werden die Informationen, die im Netzhautbild enthalten sind, einer mehrstufigen Analyse unterzogen. Die Hauptpunkte dieses algorithmischen Ansatzes sind die zwei Zwischenstufen, die in Bild A3.8 eingerahmt abgebildet sind.

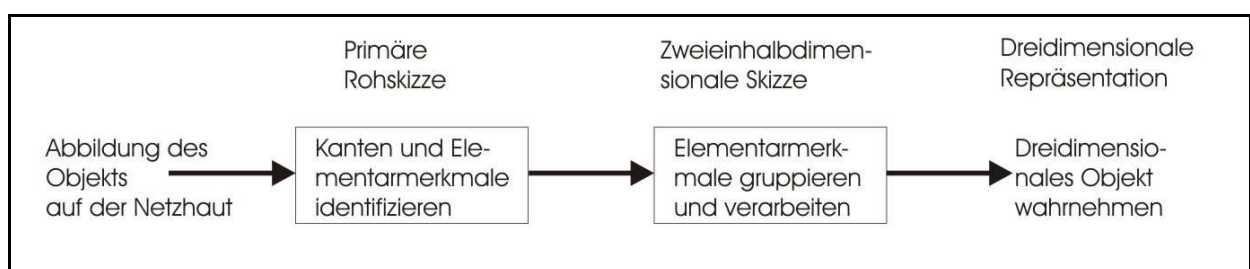


Bild A3.8: Modell des algorithmischen Ansatzes (MARR, 1982 in [GOLDSTEIN, 2002])

Anhang

In der ersten Stufe werden die Ecken und Kanten eines Objektes vom visuellen System identifiziert. Diese Merkmale werden als Veränderungen in der Intensität des Bildes wahrgenommen. Dabei werden auch die Veränderungen der Intensität berücksichtigt (beispielsweise Schatten, glänzende Flächen), die infolge von Beleuchtung auftreten. Die Intensität an den Grenzen infolge von Licht und Schatten verändert sich allmählich. An den Grenzen, die jedoch infolge von Ecken oder Kanten eines Objektes entstehen, verändert sich die Intensität abrupt. Bei der Analyse eines Objektes identifiziert das visuelle System verschiedene Elementarmerkmale. Dazu gehören geschlossene Formen (Kleckse, Flecken), Kontur- und Kantenelemente, parallele Konturelemente (Streifen) und Kontur- und Kantenenden. Das Ergebnis der Analyse ist die primäre Rohskizze, bestehend aus den Elementarmerkmalen sowie den Kanten des Objektes. Diese Rohskizze wird allerdings nicht wahrgenommen. In der zweiten Stufe des Modells werden die Informationen aus der Rohskizze weiterverarbeitet. Dazu werden die Elementarmerkmale auf der Grundlage der bereits bekannten Gestaltgesetze nach Größe und Orientierung gruppiert. Nach weiterer Verarbeitung der einzelnen Gruppen entsteht eine 2½ dimensionale Skizze. Diese Skizze wird schlussendlich in eine dreidimensionale Repräsentation umgewandelt und wahrgenommen. Es werden dreidimensionalen Modelle des Objektes gebildet und mit bereits bekannten verglichen.

Nach dieser Theorie wird das wahrzunehmende Objekt in seine Einzelmerkmale zerlegt, demnach baut diese Theorie auf der Bottom-up-Verarbeitung auf. Aus heutiger Sicht liegt darin die Schwäche, denn aus neuronalen Untersuchungen ist bekannt, dass es zwischen den neuronalen Verarbeitungsstufen Verbindungen und Rückmeldeschleifen gibt.

A3.3.4 Die Merkmalsintegrationstheorie

Die Merkmalsintegrationstheorie wurde von TREISMAN (1998) (in [GOLDSTEIN, 2002]) formuliert, wobei auch sie die Vorstellung der stufenweisen Objektwahrnehmung annahm.

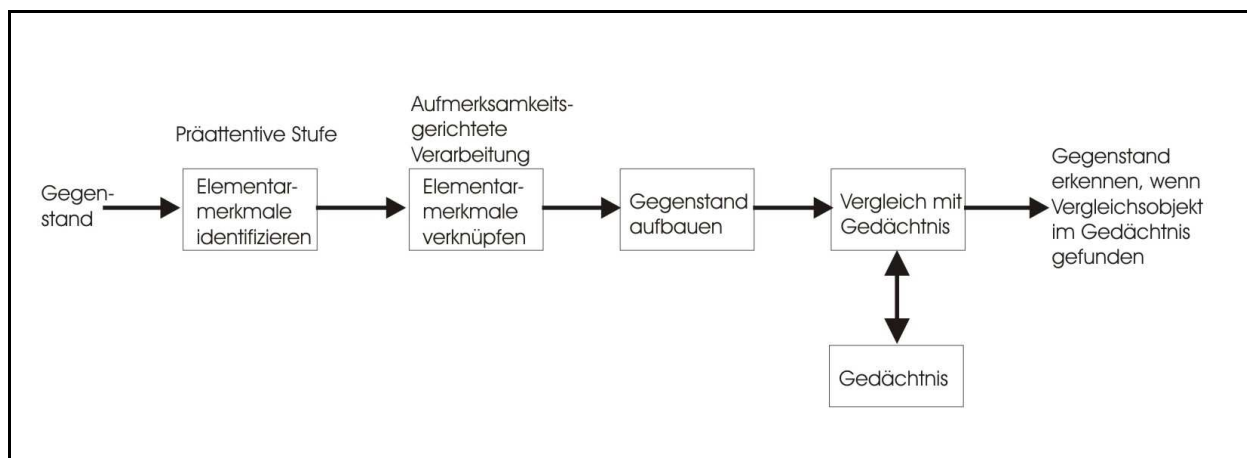


Bild A3.9: Modell der Merkmalsintegrationstheorie (TREISMAN, 1998 in [GOLDSTEIN, 2002])

Auch in diesem Modell (Bild A3.9) werden in der ersten Stufe Elementarmerkmale (siehe unten) identifiziert, die unabhängig voneinander, nebeneinander stehen. Die

zweite Stufe beinhaltet die aufmerksamkeitsgerichtete Verarbeitung. Dabei wird angenommen, dass der Beobachter seine Aufmerksamkeit auf einen bestimmten Punkt richtet. Somit können die Informationen aus den „was“ und „wo“ Bahnen miteinander verknüpft werden. Wird ein Bild jedoch nur sehr kurz dargeboten und somit auch die darin enthaltenen Reize, so kann es zu falschen Verknüpfungen kommen. Erklärbar ist dies mit den Kenntnissen der Neurophysiologie des Sehens. Wird die Tatsache betrachtet, dass Informationen wie Farbe, Form und Bewegung in getrennten Kanälen verarbeitet werden, so besteht die Möglichkeit, dass Elementarmerkmale falsch miteinander kombiniert werden. Im nächsten Schritt der Merkmalsintegrationstheorie wird der Gegenstand aufgebaut und mit bereits bekannten Gegenständen aus dem Gedächtnis verglichen. Liegt ein entsprechendes Vergleichsobjekt vor, wird der Gegenstand als solcher erkannt.

Zunächst nutzte TREISMAN (1998) die von JULESZ (1981) (beide in [GOLDSTEIN, 2002]) vorgeschlagenen Textone als Elementarmerkmale, wodurch eine Texturbereichstrennung erzeugt wird. Dazu zählen Orientierung, Linienkreuzung, „Kleckse“, kleine Punkte, größere Kreise und Flecken. Aus verschiedenen Untersuchungen identifizierte TREISMAN (1998) (in [GOLDSTEIN, 2002]) letztlich die folgenden Elementarmerkmale, die in ihrem Modell angewendet wurden: Linienbogen, Linienneigung, Farbe, Linienendpunkte, Bewegung, geschlossene Flächen, Kontrast und Helligkeit. In Bild A3.10 sind beispielhaft für drei verschiedene Elementarmerkmale die daraus entstehenden Texturbereichstrennungen aufgeführt. Das Beispiel a) (links) zeigt, dass aufgrund unterschiedlicher Neigungen der Linien zwei Bereiche gekennzeichnet sind. Im Beispiel b) (Mitte) wird die Texturbereichstrennung infolge Kontrastunterschiede erzeugt. Im Beispiel c) (rechts) hingegen ist keine Texturbereichstrennung sichtbar. Bei näherem Hinsehen ist jedoch sichtbar, dass der Buchstabe „V“ im mittleren Bereich des Bildes auf dem Kopf steht. Weshalb wird aber keine Texturbereichstrennung wahrgenommen? Der Buchstabe „V“ steht zwar auf dem Kopf, die Neigung der Linien wird dabei aber beibehalten.

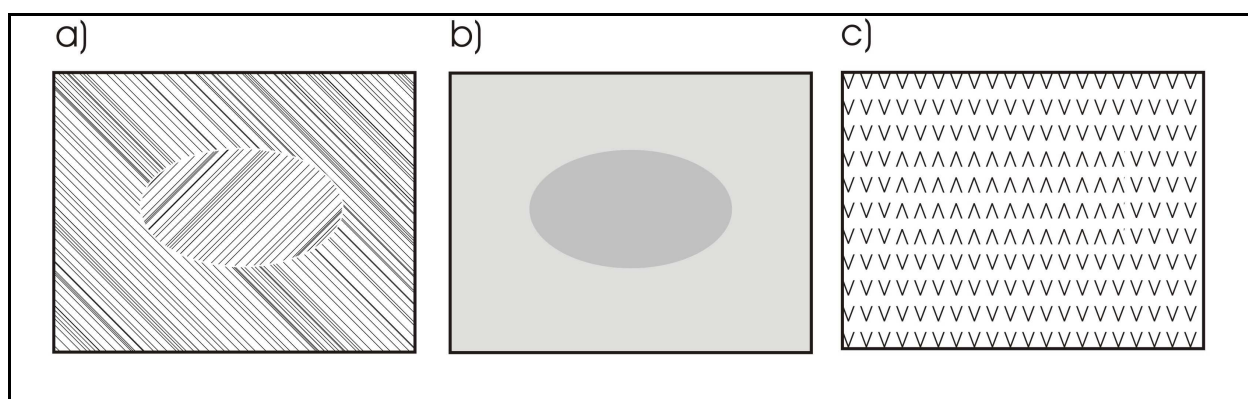


Bild A3.10: Beispiele für Texturbereichstrennung infolge von Textonunterschieden (nach NOTHDURFT, 1990 in [GOLDSTEIN, 2002])

Auch in der beschriebenen Merkmalsintegrationstheorie wird das wahrzunehmende Objekt zunächst in seine Einzelmerkmale zerlegt, demnach bauen die ersten Schritte dieser Theorie auf der Bottom-up-Verarbeitung auf. Beim Prozess des Erkennens und Klassifizierens kann allerdings von der Top-down-Verarbeitung ausgegangen

Anhang

werden. Aufgrund des Wissens über die Eigenschaften der Objekte, kann das was gesehen wurde, auch klassifiziert werden.

A3.3.5 Theorie des Objektwahrnehmens mittels elementarer Teilkörper

Die Theorie der Objektwahrnehmung mittels Zerlegen in elementare Teilkörper (*Geon-Structural-Descriptions*) wurde von BIEDERMAN (1987) (in [GOLDSTEIN, 2002]) aufgestellt. Er stellte sich dabei die Frage, ob „wir dreidimensionale Gegenstände auf der Grundlage der Wahrnehmung jener Komponenten erkennen, die diese Gegenstände ausmachen?“

Auch diese Theorie beruht auf Elementarmerkmalen, welche in diesem Zusammenhang elementare Teilkörper, wie beispielsweise Zylinder und Quader darstellen. Diese elementaren Teilkörper wurden als Geone bezeichnet. Insgesamt 36 dieser Geone wurden benannt, durch deren vielfältiger Kombination tausende Objekte entstehen können (Bild A3.11). Nach dieser Theorie erkennen wir einen Gegenstand, indem wir seine Geone wahrnehmen. Um einen Gegenstand eindeutig erkennen zu können, ist es ausreichend, nur seine wichtigsten Geone zu identifizieren. Untersuchungen zeigten, dass beispielsweise ein Flugzeug, welches vollständig aus neun Geonen besteht, von 80% der Teilnehmer erkannt werden konnte, obwohl nur drei Geone gezeigt wurden.

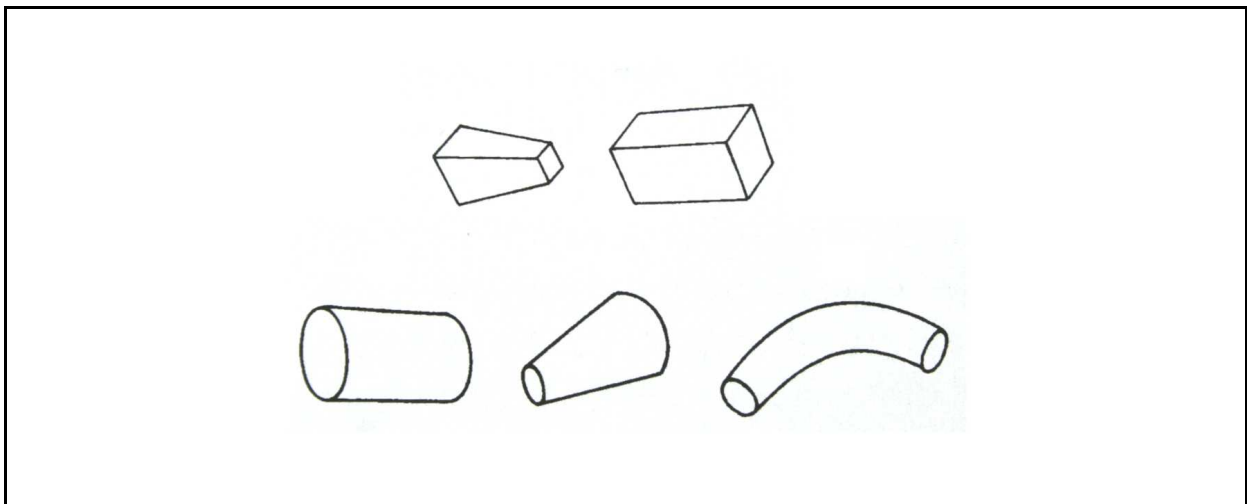


Bild A3.11: Geone (BIEDERMAN, 1987 in [GOLDSTEIN, 2002])

Der Sichtenunabhängigkeit der Repräsentationen sowie deren Robustheit gegenüber Störungen sind die Stärken dieser Theorie. Die größte Schwäche dieser Theorie besteht darin, dass beim Zerlegen in Teilkörper wichtige Detailinformationen (beispielsweise Feinstruktur, Textur) verloren gehen können, die für das Erkennen und damit auch für das weitere Handeln sehr wichtig sind. Ein weiterer Einwand liegt darin, dass es mehrere Möglichkeiten des „Zerlegens“ in Teilkörper gibt. Daraus ergibt sich folgende Frage: Wie kann das visuelle System die Teilkörper zuverlässig unterscheiden und identifizieren?

A3.3.6 Kanonische Ansichten

Unter kanonische Ansichten werden in diesem Zusammenhang charakteristische Ansichten eines Gegenstandes verstanden. Es ist bekannt, dass ein Gegenstand, der in einer üblichen Position gezeigt wird, schneller und sicherer erkannt werden kann, als ein Gegenstand, der in einer eher unüblichen Position gezeigt wird. Es wird angenommen, dass diese kanonischen Ansichten eines Gegenstandes im Gedächtnis repräsentiert sind.

In einer Untersuchung von BLANZ ET AL. (1999) (in [GOLDSTEIN, 2002]) hatten die Probanden die Aufgabe, für die präsentierten Gegenstände jeweils drei typische Ansichten mittels Drehen im dreidimensionalen Raum zu erstellen. Für einen Stuhl wurden von allen Probanden drei Ansichten gewählt, die sich jeweils auf einen Bereich gruppieren. Die folgenden drei Ansichten wurden gewählt:

- gerade auf den Stuhl etwas schräg von oben
- im Winkel von ungefähr 35° von links etwas schräg von oben und
- im Winkel von ungefähr 35° von rechts etwas schräg von oben.

Anhand von weiteren Untersuchungen konnte zudem ermittelt werden, dass bei der Präsentation von Gegenständen in ihren kanonischen Ansichten, die Erkennungszeiten kürzer waren. Somit konnte die Vermutung, dass der Mensch mehrere Ansichten eines Gegenstandes gespeichert hat, begründet werden. Weitere Ansichten können durch Lernen hinzugefügt werden.

Anhang

A4 Das ausführliche Perception-Modell

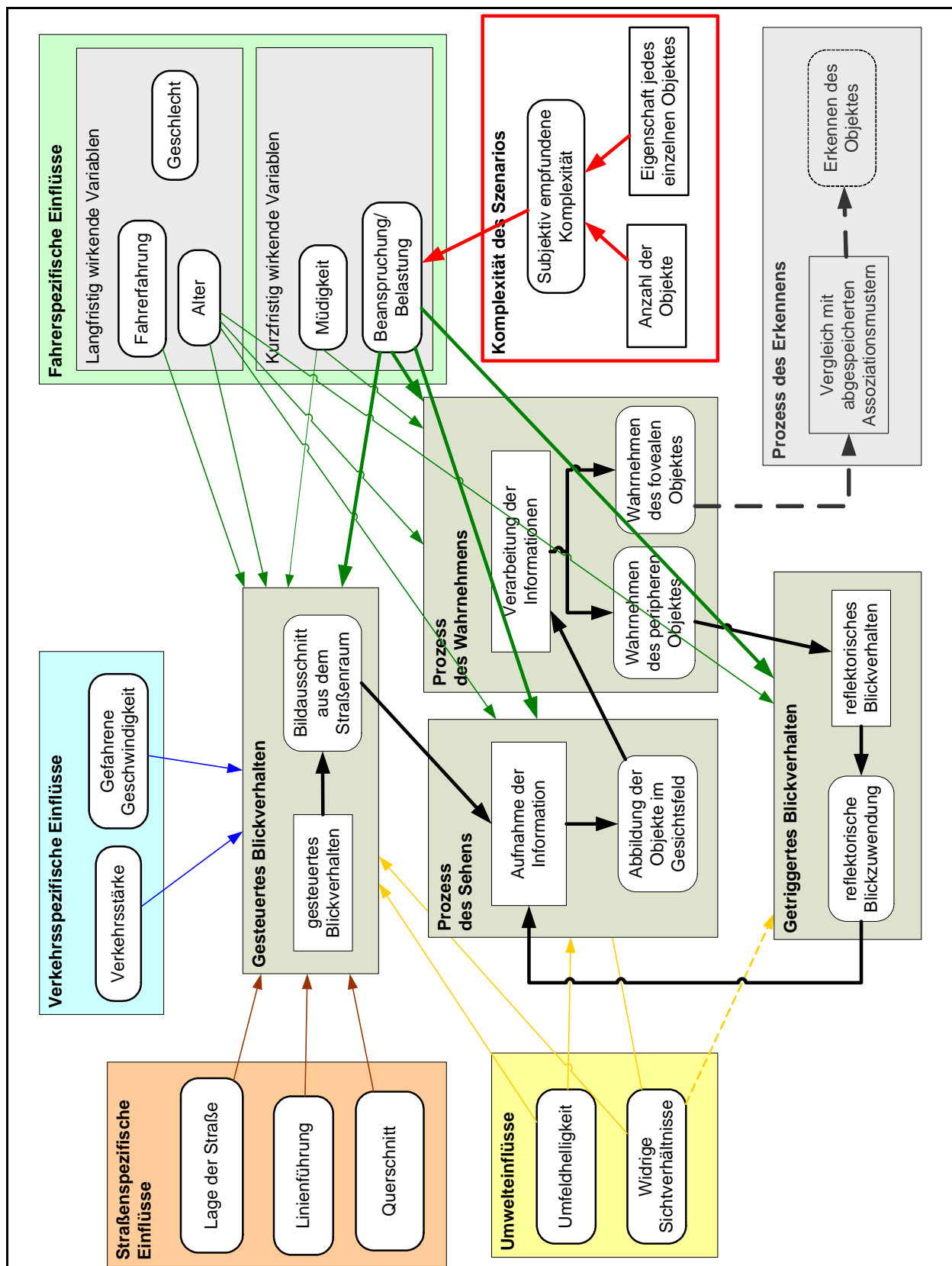


Bild A4.1: Ausführlicher Aufbau des Perception-Modells

A5 Das Lichtlabor

A5.1 Lichttechnische Messungen der Projektionsleinwand

Bestimmung des gerichteten und diffusen Reflexionsgrades						
Untersuchungsgegenstand	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6
Reflexionsgrad des Arbeitsreflexionsnormals (Keramik) $\rho(N)$:	0,885					
Reflexionsgrad des Arbeitsreflexionsnormals (Spiegel) $\rho(N)$:	0,924					
Bestimmung des Reflexionsgrades ρ						
Reflexionsgrad der Probe ρ :	0,898	0,909	0,898	0,906	0,904	0,900
Bestimmung des diffusen Reflexionsgrades ρ_d						
Anzeigewert des Spiegels E_{Sp}	0	0	0	0	0	0
Anzeigewert bei Streulichtmessung E_{streu}	0	0	0	0	0	0
Anzeigewert der Probe E_d	899	909	898	906	904	900
Anzeigewert des Weißstandards E_N	885	885	885	885	885	885
Zusammenfassung der Ergebnisse						
Reflexionsgrad der Probe ρ :	0,898	0,909	0,898	0,906	0,904	0,900
Diffuser Reflexionsgrad ρ_d :	0,899	0,909	0,898	0,906	0,904	0,900
Gerichteter Reflexionsgrad ρ_r :	-0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabelle A5.1: **Datenblatt zur Messung des Reflexionsgrades mit der Ulbrichtschen Kugel nach DIN 5036, Teil 3**

Anhang

A5.2 Überprüfung der Übereinstimmung von Realität und Labor

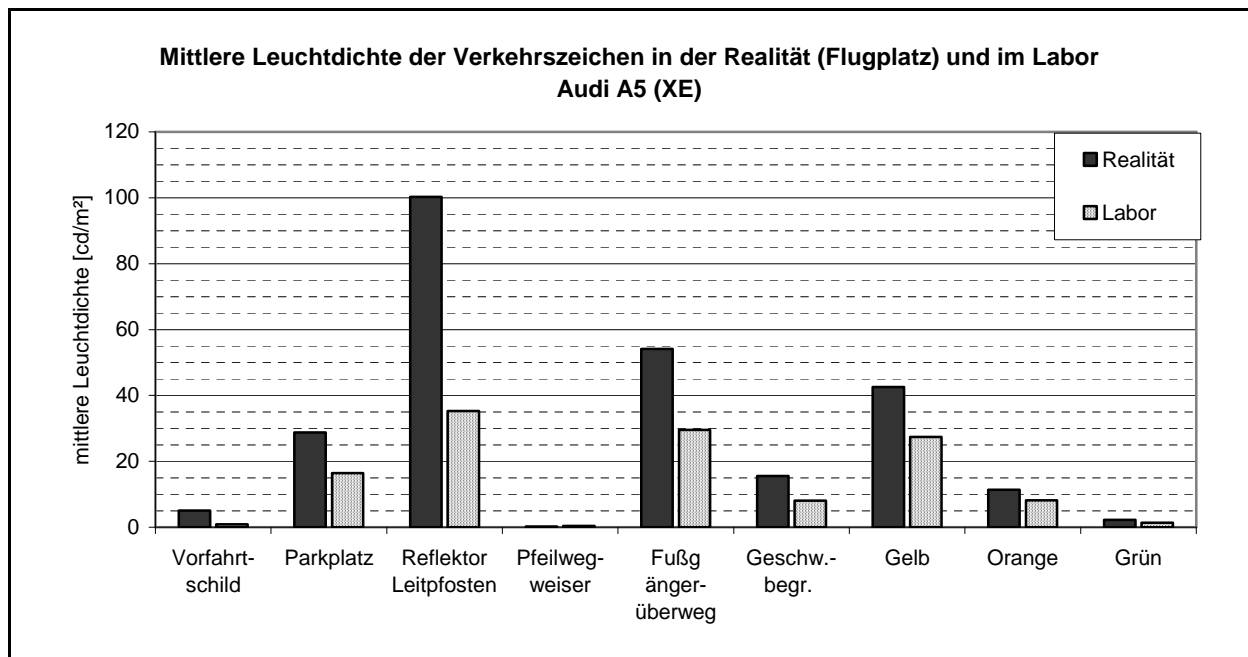


Bild A5.1: Gegenüberstellung der mittlere Leuchtdichten der Verkehrszeichen in der Realität und im Labor für den Audi A5 (XE)

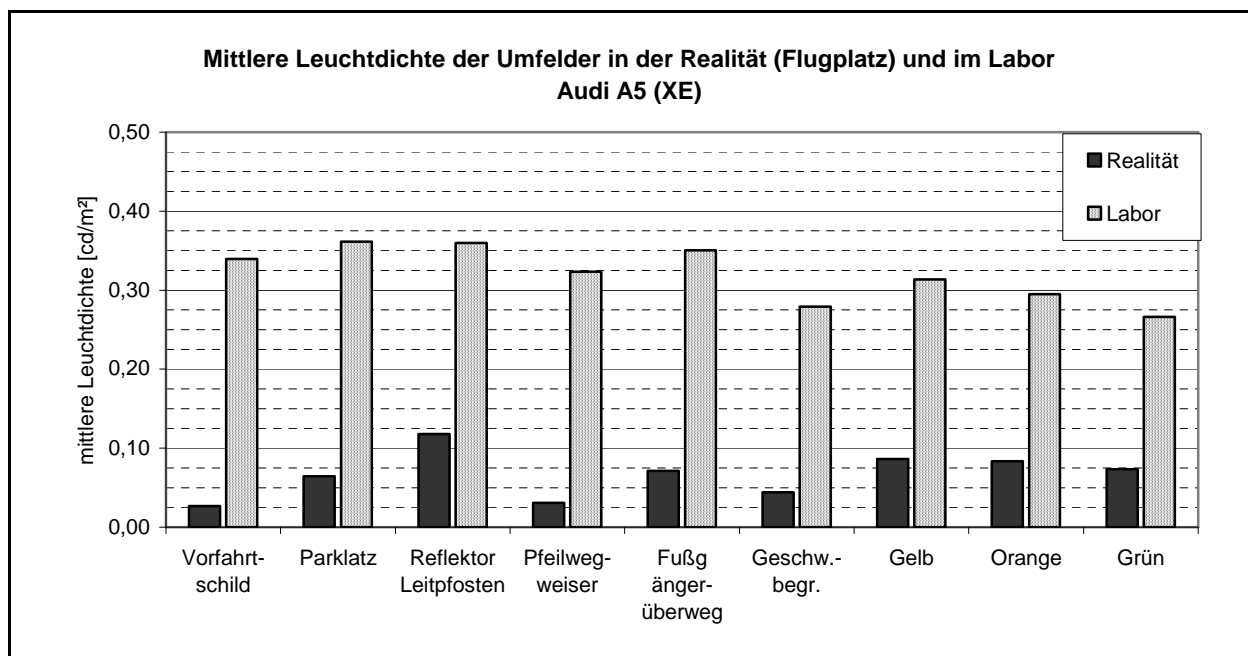


Bild A5.2: Gegenüberstellung der mittlere Leuchtdichten der Umfeld der Verkehrszeichen in der Realität und im Labor für den Audi A5 (XE)

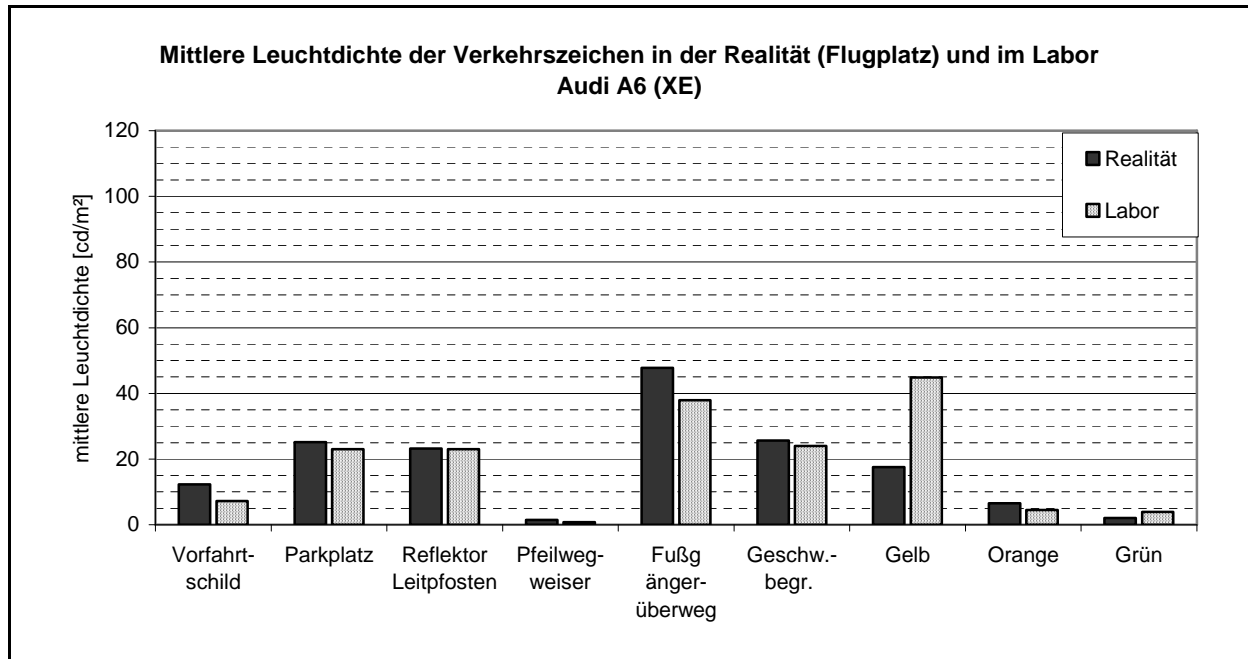


Bild A5.3: Gegenüberstellung der mittlere Leuchtdichten der Verkehrszeichen in der Realität und im Labor für den Audi A6 (XE)

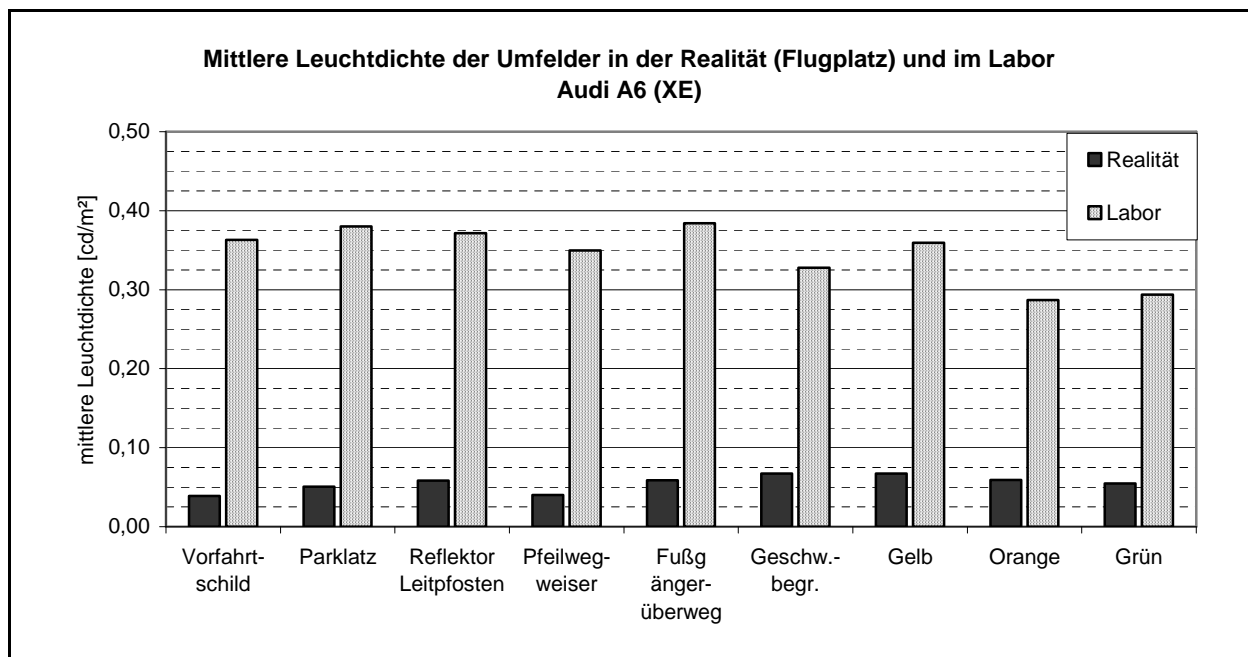


Bild A5.4: Gegenüberstellung der mittlere Leuchtdichten der Umfeld der Verkehrszeichen in der Realität und im Labor für den Audi A6 (XE)

Anhang

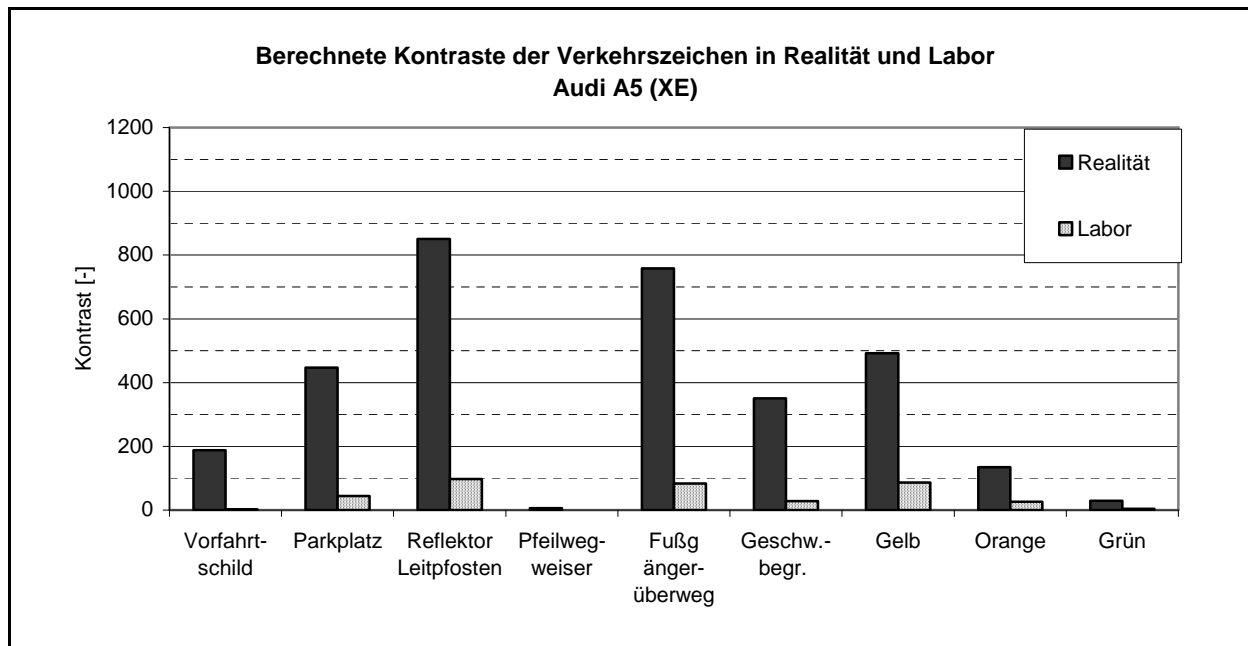


Bild A5.5: Gegenüberstellung der Kontraste in der Realität und im Labor für den Audi A5 (XE)

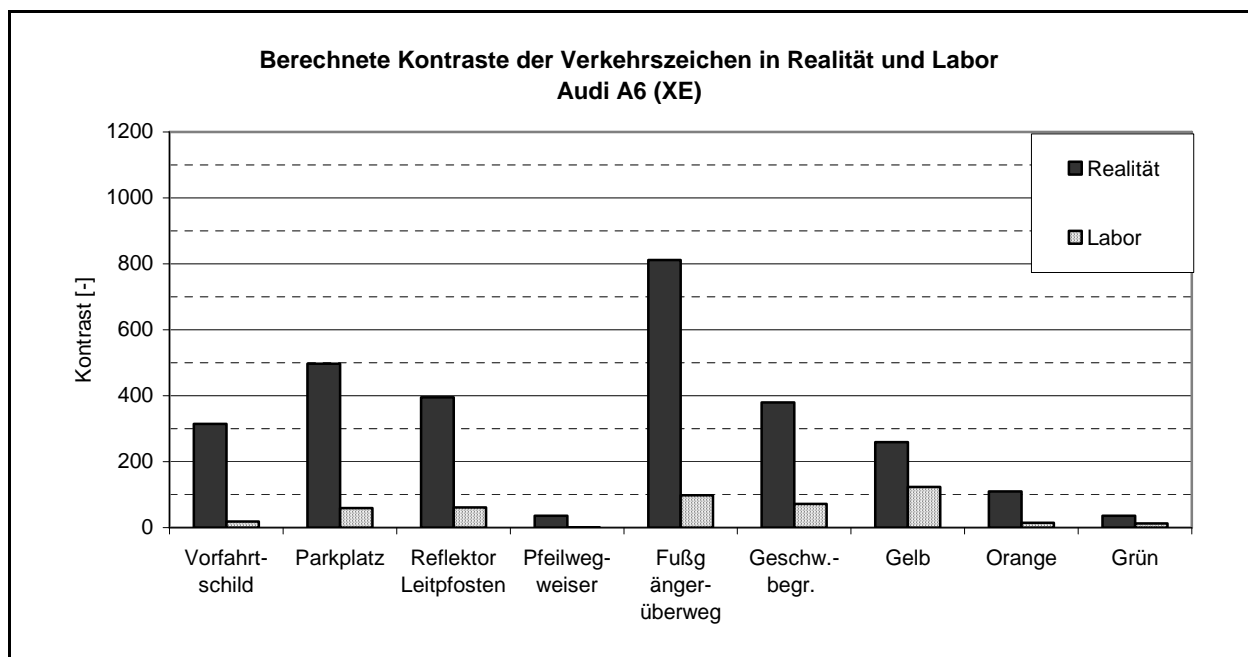


Bild A5.6: Gegenüberstellung der Kontraste in der Realität und im Labor für den Audi A6 (XE)

Anhang

Verkehrszeichen	α [']	ΔL [cd/m ²]	ΔL_s [cd/m ²]	Nachweis $\Delta L > \Delta L_s$
Vorfahrtschild	42,6259	0,5351	0,0090	WAHR
Parkplatzschild	38,9595	16,0787	0,0098	WAHR
Reflektor Leitpfosten	4,1253	34,9503	0,1135	WAHR
Pfeilwegweiser	142,9279	0,0530	0,0057	WAHR
Fußgängerüberweg	47,2088	29,1896	0,0087	WAHR
Geschwindigkeitsbegrenzung	89,3613	7,7547	0,0059	WAHR
Gelbes Zusatzschild	120,0431	27,1062	0,0058	WAHR
Oranges Zusatzschild	120,0431	7,8439	0,0056	WAHR
Grünes Zusatzschild	120,0431	1,0717	0,0053	WAHR

Tabelle A5.2: Der Nachweis der Wahrnehmbarkeit der Verkehrszeichen im Labor - Audi A5 (XE)

Verkehrszeichen	α [']	ΔL [cd/m ²]	ΔL_s [cd/m ²]	Nachweis $\Delta L > \Delta L_s$
Vorfahrtschild	48,1253	6,8739	0,0088	WAHR
Parkplatzschild	36,2096	22,6699	0,0105	WAHR
Reflektor Leitpfosten	4,5837	22,6283	0,0980	WAHR
Pfeilwegweiser	158,9397	0,4636	0,0059	WAHR
Fußgängerüberweg	49,5001	37,5259	0,0089	WAHR
Geschwindigkeitsbegrenzung	90,7354	23,6121	0,0064	WAHR
Gelbes Zusatzschild	119,1275	44,4905	0,0063	WAHR
Oranges Zusatzschild	119,1275	4,1950	0,0055	WAHR
Grünes Zusatzschild	119,1275	3,6161	0,0056	WAHR

Tabelle A5.3: Der Nachweis der Wahrnehmbarkeit der Verkehrszeichen im Labor - Audi A6 (XE)

Anhang

A6 Angaben zum Probandenkollektiv

A6.1 Fragebogen

Fahrerdemographische Merkmale	
1. Alter	_____
2. Geschlecht	<input type="checkbox"/> weiblich <input type="checkbox"/> männlich
3. Seit wie vielen Jahren besitzen Sie den Führerschein?	_____
4. Wie viele Kilometer sind Sie in den letzten zwölf Monaten gefahren?	<input type="checkbox"/> < 10.000 km <input type="checkbox"/> 10.000 bis 20.000 km <input type="checkbox"/> > 20.000 km
5. Anteil der Nachtfahrten in den letzten zwölf Monaten	<input type="checkbox"/> gering (< 15%) <input type="checkbox"/> durchschnittlich (15 bis 25%) <input type="checkbox"/> häufig (>25 %)
6. Welche Sehfehler haben Sie? (bspw. Kurz- od. Weitsichtigkeit, Farbenblindheit oder Farbfehlsichtigkeit usw.)	_____
7. Ist die Kurz- od. Weitsichtigkeit korrigiert? (Brille, Kontaktlinsen)	_____

Bild A6.1: Fragebogen zur Erfassung der fahrerdemographischen Merkmale

A6.2 Fahrerdemographische Daten des „Stammkollektivs“ und der zusätzlichen fünf Probanden des Untersuchungsabschnitts II

Proband	Alter	Geschlecht	Jahre Führer-scheinbesitz	Kilometer-leistung letzte 12 Monate	Anteil der Nachtfahrten letzte 12 Monate	Sehfehler	Korrektur
1	28	männlich	10	20.000	durchschnitt	nein	-
2	35	männlich	17	20.000	durchschnitt	ja	ja
3	30	männlich	12	30.000	häufig	nein	-
4	28	weiblich	10	8.000	gering	ja	ja
5	28	weiblich	10	50.000	häufig	nein	-
6	29	männlich	11	30.000	häufig	nein	-
7	48	weiblich	10	10.000	gering	ja	ja
8	32	männlich	14	30.000	häufig	ja	ja
9	31	männlich	13	5.000	gering	ja	ja
10	58	männlich	39	40.000	häufig	ja	ja
11	27	männlich	9	1.000	häufig	ja	ja
12	65	weiblich	40	6.000	gering	ja	ja
13	69	männlich	48	20.000	durchschnitt	nein	-
14	49	weiblich	31	8.000	gering	ja	ja
15	61	männlich	33	30.000	durchschnitt	ja	ja
16	65	männlich	46	30.000	durchschnitt	ja	ja
17	45	weiblich	25	12.000	gering	ja	ja
18	48	männlich	30	30.000	durchschnitt	nein	-

Tabelle A6.1: Fahrerdemographische Daten des „Stammkollektivs“

Proband	Alter	Geschlecht	Jahre Führerschein-besitz	Kilometer-leistung letzte 12 Monate	Anteil der Nachtfahrten letzte 12 Monate	Sehfehler	Korrektur
19	49	männlich	30	7.000	gering	ja	ja
20	46	männlich	12	0	gering	ja	ja
21	43	männlich	25	25.000	durchschnitt	ja	ja
22	78	männlich	57	15.000	gering	ja	ja
23	82	männlich	64	3.000	gering	ja	ja

Tabelle A6.2: Fahrerdemographische Daten der zusätzlichen fünf Probanden (UAII)

Anhang

A7 Statistischen Auswertungen weiterer Parameter des Untersuchungsabschnitts I sowie ergänzende Daten

A7.1 Der Einfluss des Geschlechts

A7.1.1 Allgemeines

Ingesamt nahmen zwölf männliche und sechs weibliche Probanden an der Untersuchung teil. In Tabelle A 7.1 ist die Verteilung der Probanden hinsichtlich des Geschlechts in den drei Altersgruppen dargestellt. Der Zusammenhang zwischen Geschlecht und Bewertung der Komplexität wird nur für das gesamte Probandenkollektiv untersucht. Einerseits wird nicht erwartet, dass der Einfluss des Geschlechts altersabhängig ist, andererseits kann aufgrund des geringen Stichprobenumfangs innerhalb der Altersgruppen eine statistische Prüfung dieses Zusammenhangs nicht durchgeführt werden.

Variable \ Geschlecht	Geschlecht	
	männlich	weiblich
Alle	12	6
Altersgruppe jung	7	2
Altersgruppe mittel	2	3
Altersgruppe alt	3	1

Tabelle A 7.1: Verteilung der Probanden bezogen auf das Geschlecht

A7.1.2 Statistische Analyse des Parameters *Geschlecht*

In Bild A 7.1 sind die individuellen Mediane der Komplexität aller Probanden aufgetragen. Das Diagramm ist in zwei Bereiche unterteilt, im linken Bereich befinden sich die Daten der männlichen Probanden, im rechten Bereich die der weiblichen Probanden. Der Wertebereich der individuellen Mediane der männlichen Probanden liegt zwischen 1,26 und 3,46. Über die Hälfte der Werte der männlichen Probanden befinden sich in einem engen Band um den Komplexitätswert 1,5. Ein Drittel der Werte liegt in einem engen Band um den Komplexitätswert 2,5. Nur der Wert eines Probanden befindet sich im Bereich oberhalb des Komplexitätswertes 3,0. Für die weiblichen Probanden ist erkennbar, dass die individuellen Mediane für die Bewertungen der Komplexität im Wertebereich zwischen 1,41 und 2,40 liegen. Der „weibliche“ Wertebereich ist somit schmaler und liegt innerhalb dem Wertebereich der männlichen Probanden. Vergleichbar zum männlichen Geschlecht befinden sich zwei Drittel der Werte in einem engen Band um den Komplexitätswert 1,5. Ein Drittel der Werte liegt in einem engen Band um den Komplexitätswert 2,3.

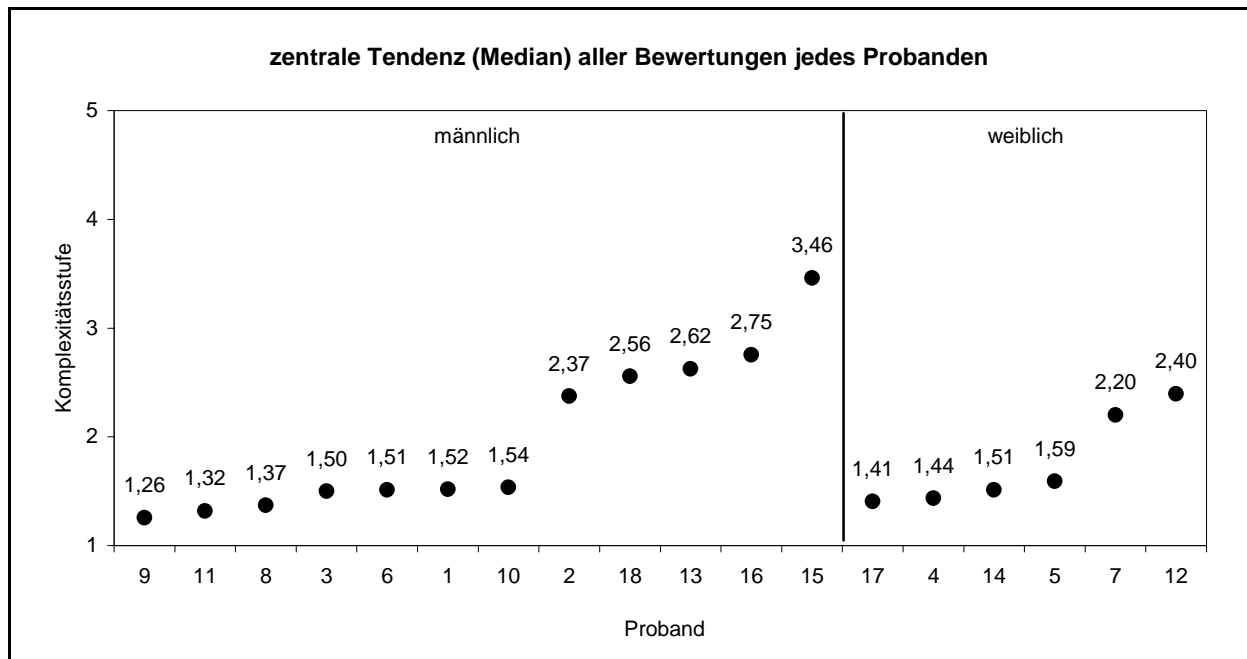


Bild A 7.1: Individuelle Mediane der subjektiv empfundene Komplexität für jeden Probanden – gruppiert nach Geschlecht

Aus den Werten der einzelnen Probanden einer Geschlechtsausprägung wird die zentrale Tendenz (Mediane) für dieses Geschlecht bestimmt. Im folgenden Bild A 7.2 sind die Mediane sowie die Minima und Maxima der beiden Geschlechter dargestellt.

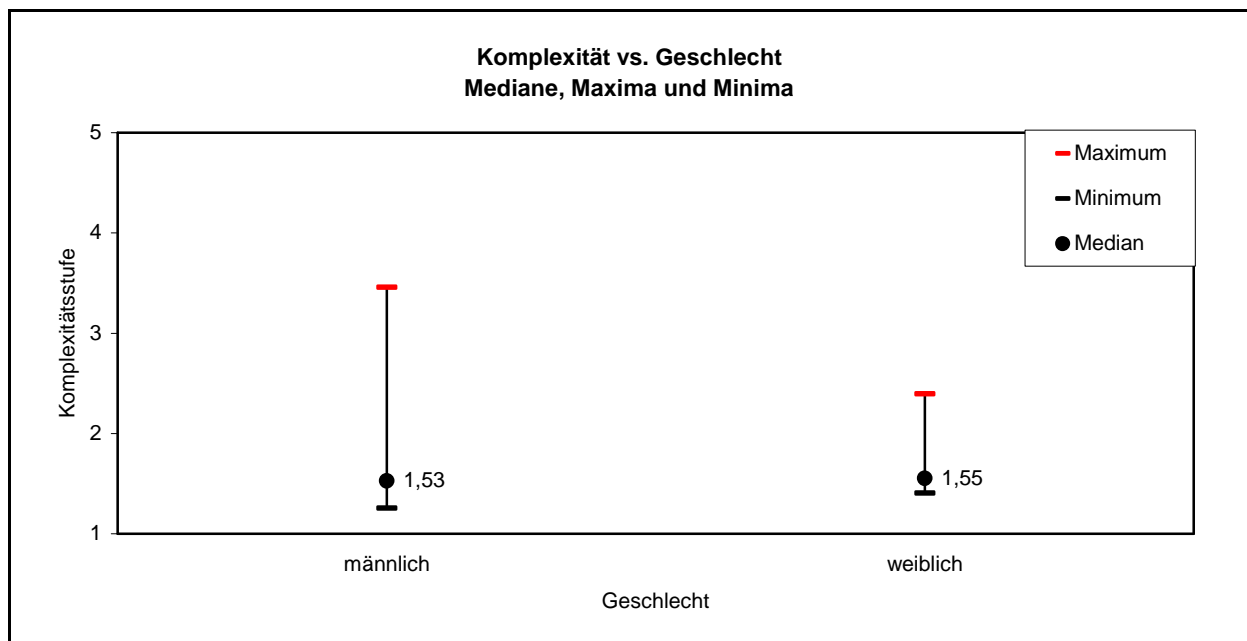


Bild A 7.2: Median, Minimum und Maximum für männliche und für weibliche Probanden

Anhand der Lage der Mediane ist erkennbar, dass dieser für das männliche Geschlecht geringfügig niedriger liegt als für das weibliche Geschlecht, wobei alle „weiblichen“ Werte innerhalb der Spannweite der männliche Probanden liegen. Es lassen sich die folgenden zwei Hypothesen formulieren, die Nullhypothese (H0) und die Alternativhypothese (H1).

Anhang

H0: Beide Geschlechter haben hinsichtlich der subjektiv empfundenen Komplexität die gleiche zentrale Tendenz.

H1: Beide Geschlechter haben hinsichtlich der subjektiv empfundenen Komplexität nicht die gleiche zentrale Tendenz; sie unterscheiden sich signifikant.

Anhand des Tests auf signifikante Unterschiede wird überprüft, ob sich die beiden Stichproben hinsichtlich ihrer zentralen Tendenzen (Mediane) signifikant voneinander unterscheiden. Die Anzahl der Stichproben beträgt zwei und diese sind voneinander unabhängig. Zudem weisen die untersuchten Variablen (Geschlecht, Komplexitätsbewertung) Ordinalniveau auf. Demnach wird der U-Test von Mann und Whitney durchgeführt. (vgl. paarweiser Vergleich in Kapitel 5.5.2) ([BORTZ, 1985], [ZÖFEL, 2002])

In Tabelle A 7.2 ist das Ergebnis des Signifikanztests dargestellt. Für die Prüfgröße U konnte ein U-Wert von 33,00 ermittelt werden. Der kritische U-Werte für $n_1 = 6$ und $n_2 = 12$ auf dem Signifikanzniveau $p \leq 0,05$ beträgt 14,00. Der ermittelte Wert (33,00) übersteigt den kritischen U-Wert (14,00). Demnach unterscheiden sich die beiden Stichproben hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz nicht signifikant voneinander, der Unterschied kann als zufällig angenommen werden. Die Nullhypothese kann nicht verworfen werden.

Signifikanztest: U-Test von Mann und Whitney	
U-Wert _(berechnet)	33,00
U-Wert _(kritischer Tabellenwert) (für $p \leq 0,05$, $n_1 = 6$, $n_2 = 12$)	14,00
Bedingung: U-Wert _(berechnet) > U-Wert _(kritischer Tabellenwert)	<u>nicht</u> erfüllt
Die Nullhypothese ist nicht zu verwerfen.	

Tabelle A 7.2: Ergebnis des Signifikanztests der Gleichheit der Mediane je Geschlecht

A7.1.3 Diskussion der Ergebnisse

Die statistische Analyse zwischen den beiden Geschlechtern ergibt, dass kein signifikanter Unterschied vorliegt. Die Nullhypothese ist demnach anzunehmen.

Dieses Ergebnis bestätigt zum Einen die bereits gewonnenen Erkenntnisse von HOLTE (1993) (in [ABENDROTH, 2001]), wonach keine geschlechterspezifischen Unterschiede bei der Bewältigung der Fahraufgabe existieren. Zum Anderen widerspricht es den Erkenntnissen von HARRINGTON und MCBRIDE (1970) (in [COHEN, 1986]) und TRÄNKLE und METKER (1992), wonach männliche Fahrer ein höheres Risiko billigen als weibliche Fahrer und schwierige Aufgaben als leichter bewältigbar einstufen als Frauen. Nach diesen Erkenntnissen würden die männlichen Fahrer die Schwierigkeit des Szenarios verharmlosen und somit die Komplexität des Szenarios niedriger bewerten als die weiblichen Fahrer.

A7.2 Der Einfluss der Fahrleistung

A7.2.1 Allgemeines

Der Einflussparameter Fahrleistung steht hierbei für die Fahrleistung innerhalb der letzten 12 Monate und wird in die folgenden drei Ausprägungen gegliedert: weniger als 10.000 km, 10.000 bis 20.000 km und mehr als 20.000 km. In Tabelle A 7.3 ist die Verteilung der Probanden hinsichtlich dieser Ausprägungen dargestellt.

Fahrleistung Variable	< 10.000 km	10.000 bis 20.000 km	> 20.000 km
Alle	6	4	8
Altersgruppe jung	3	2	4
Altersgruppe mittel	2	1	2
Altersgruppe alt	1	1	2

Tabelle A 7.3: Verteilung der Probanden bezogen auf Fahrleistung (letzte 12 Monate)

Der Zusammenhang zwischen Fahrleistung und Bewertung der Komplexität kann zunächst nur für das gesamte Probandenkollektiv erfolgen. Eine statistische Prüfung dieses Zusammenhangs innerhalb der Altersgruppen ist aufgrund des geringen Stichprobenumfangs nicht möglich.

A7.2.2 Statistische Analyse des Parameters *Fahrleistung*

In Bild A 7.3 sind die individuellen Mediane der Komplexität aller Probanden aufgetragen. Das Diagramm ist in drei Bereiche unterteilt, welche die drei Ausprägungen dieser Variable widerspiegeln. Die individuellen Mediane der Probanden, mit einer Fahrleistung von weniger als 10.000 km befinden sich im linken Bereich des Diagramms, im mittleren Bereich sind die individuellen Mediane der Probanden mit einer Fahrleistung von 10.000 bis 20.000 km aufgetragen, die individuellen Mediane der Probanden mit mehr als 20.000 km Fahrleistung sind im rechten Bereich des Diagramms zu sehen. Für alle drei Ausprägungen ist eine ähnliche Verteilung der individuellen Mediane erkennbar. Eine Ausnahme bildet der Medianwert des Probanden 15 im rechten Bereich des Diagramms. Für alle drei Ausprägungen ergeben sich zwei Komplexitätswerte (1,5 und 2,5), um die die individuellen Mediane liegen.

Anhang

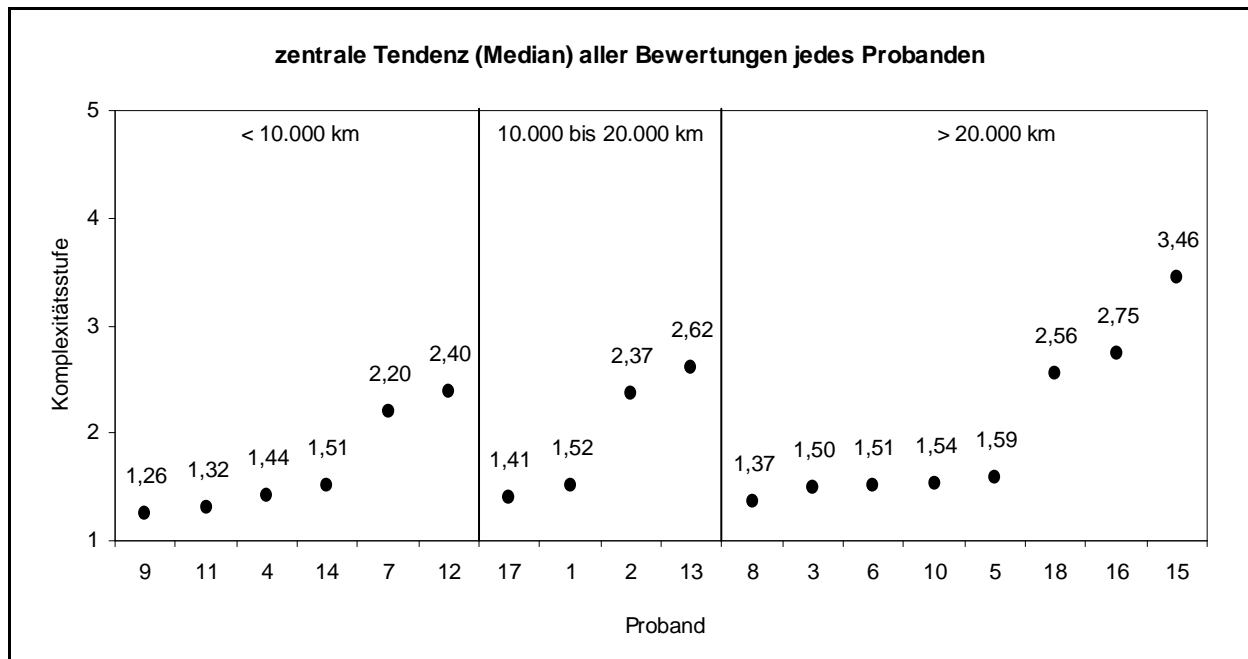


Bild A 7.3: Individuelle Mediane der subjektiv empfundene Komplexität für jeden Probanden – gruppiert nach Fahrleistung innerhalb der letzten 12 Monate

Aus den Werten der einzelnen Probanden einer Fahrleistungsausprägung wird die zentrale Tendenz (Mediane) für diese Ausprägung bestimmt. In Bild A 7.4 sind die Mediane sowie die Minima und Maxima der drei Ausprägungen dargestellt.

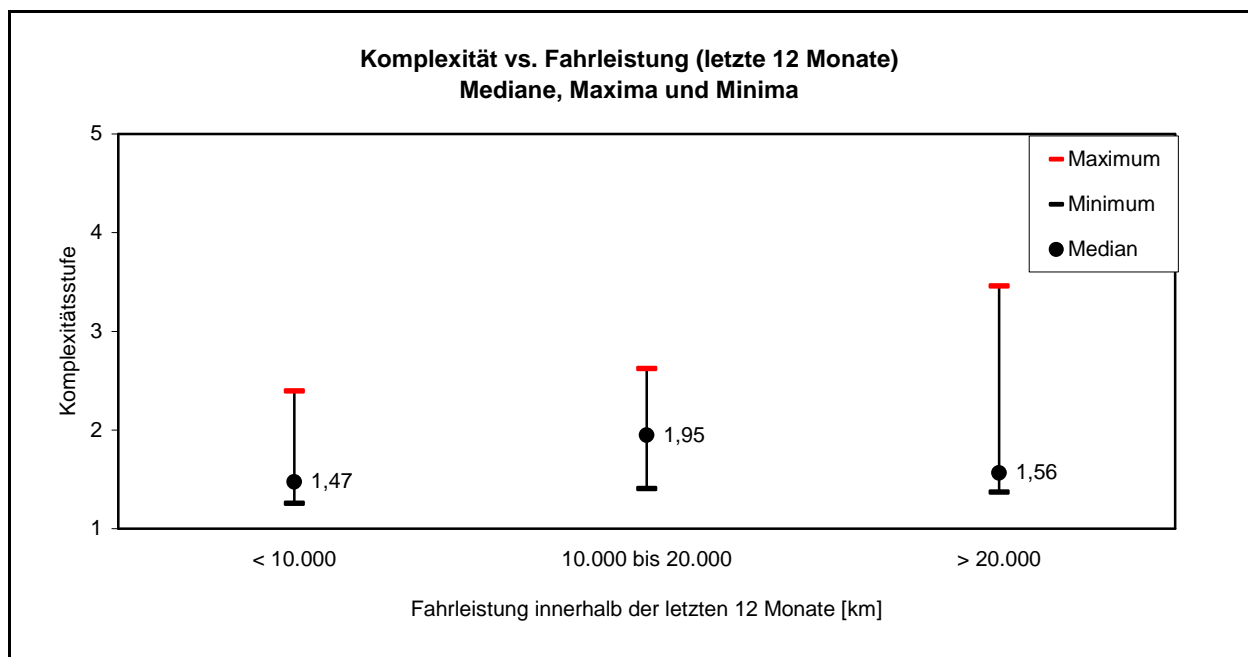


Bild A 7.4: Median, Minimum und Maximum für die drei Ausprägungen der Fahrleistung innerhalb der letzten 12 Monate

Die Lage der Mediane spiegelt einen U-förmigen Verlauf wider, wobei das „U“ auf dem Kopf steht. Zunächst steigt die Bewertung der Komplexität mit zunehmender Fahrleistung an, danach sinkt sie mit weiter zunehmender Fahrleistung wieder ab. Probanden der ersten und der dritten Fahrleistungsausprägung bewerten die Szenarien annähernd gleich. Im Vergleich dazu bewerten die Probanden der zweiten

Ausprägung die Szenarien um ca. 0,5 Komplexitätsstufen höher. Eine mögliche Erklärung für diesen Verlauf ist die Anzahl der Probanden innerhalb der drei Ausprägungen. (vgl. Tabelle A 7.3) Demnach befinden sich in der Gruppe der zweiten Fahrleistungsausprägung nur vier Probanden, während sich in den anderen beiden Gruppen sechs bzw. acht Probanden befinden. Ein altersabhängiger Einfluss kann ausgeschlossen werden, da sich die Verteilungen der Probanden in den drei Ausprägungen hinsichtlich des Alters sehr ähneln. Daher wird hier kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Fahrleistung und subjektiv empfundener Komplexität vermutet. Es lassen sich die folgenden zwei Hypothesen formulieren, die Nullhypothese (H0) und die Alternativhypothese (H1).

H0: Die drei Ausprägungen der Fahrleistung haben hinsichtlich der subjektiv empfundenen Komplexität die gleiche zentrale Tendenz.

H1: Die drei Ausprägungen der Fahrleistung haben hinsichtlich der subjektiv empfundenen Komplexität nicht die gleiche zentrale Tendenz; sie unterscheiden sich signifikant.

Anhand des Tests auf signifikante Unterschiede wird überprüft, ob die Nullhypothese zugunsten der Alternativhypothese verworfen werden kann. Für diesen Zusammenhang (Ordinalniveau, mehr als zwei unabhängige Stichproben) wird der H-Test nach Kruskal und Wallis herangezogen. (vgl. Kapitel 5.5.2) ([BORTZ, 1985], [ZÖFEL, 2002]) In Tabelle A 7.4 ist das Ergebnis dieses Signifikanztests dargestellt. Für die Prüfgröße Chi-Quadrat konnte ein Wert von 1,987 ermittelt werden. Der kritische Chi-Quadrat-Wert für zwei Freiheitsgrade (df) auf dem Signifikanzniveau $p \leq 0,05$ beträgt 5,991. Der ermittelte Wert übersteigt den kritischen Tabellenwert nicht. Demnach unterscheiden sich die drei Stichproben hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz auf dem gewählten Signifikanzniveau nicht signifikant voneinander. Die Nullhypothese kann nicht verworfen werden.

Signifikanztest: H-Test nach Kruskal und Wallis	
Chi-Quadrat _(berechnet)	1,987
Chi-Quadrat _(kritischer Tabellenwert) (für $p \leq 0,05$, $df = 2$)	5,991
Bedingung: Chi-Quadrat _(berechnet) > Chi-Quadrat _(kritischer Tabellenwert)	<u>nicht</u> erfüllt
Die Nullhypothese ist nicht zu verwerfen.	

Tabelle A 7.4: Ergebnis des Signifikanztests der Gleichheit der Mediane je Fahrleistungsausprägung

A7.2.3 Diskussion der Ergebnisse

Die statistische Analyse hinsichtlich der Signifikanz der Unterschiede zwischen den drei Ausprägungen der Fahrleistung ergab, dass kein signifikanter Unterschied vorliegt. Demnach kann kein Unterschied in der Bewertung der Komplexität zwischen den Probanden der verschiedenen Ausprägungen der Fahrleistung nachgewiesen werden.

Anhang

Da alle Probanden den Führerschein bereits seit mehr als sieben Jahren besitzen, kann davon ausgegangen werden, dass keine Fahranfänger an den Untersuchungen teilnahmen. Alle Probanden hatten somit unabhängig von ihrem Alter bereits genügend Erfahrung gesammelt und ein dementsprechendes „Verhaltensmuster“ entwickelt. Das Ergebnis der statistischen Analyse bestätigt die bereits gewonnenen Erkenntnisse von COHEN (1987a), FASTENMEIER (1994) und anderen. (vgl. Kapitel 4.6.3) Es zeigt, dass der einmal gesammelte Erfahrungsschatz beständig ist und dass sich dieser Erfahrungsschatz aufgrund verschieden großer Fahrleistung innerhalb der letzten 12 Monate nicht signifikant verändert.

A7.3 Der Einfluss des Anteils der Nachtfahrten

A7.3.1 Allgemeines

Der Einflussparameter Anteil der Nachtfahrten steht hierbei für den Anteil der Nachtfahrten innerhalb der letzten 12 Monate und wurde in die folgenden drei Ausprägungen gegliedert: kleiner als 15%, 15 bis 25% und größer als 25%. Die Verteilung der Probanden hinsichtlich dieser Variable ist in Tabelle A 7.5 dargestellt. Bezogen auf das Probandenkollektiv wird deutlich, dass die jungen Probanden vermehrt bei Dunkelheit unterwegs sind. Im Gegensatz dazu scheinen die älteren Fahrer die Fahrten bei Dunkelheit zu meiden bzw. auf ein Minimum zu reduzieren. Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen dem Anteil der Nachtfahrten und der subjektiv empfundenen Komplexität untersucht. Dieser Zusammenhang wird bezogen auf das gesamte Probandenkollektiv analysiert. Innerhalb der Altersgruppen kann dieser Zusammenhang aufgrund des geringen Stichprobenumfangs nicht untersucht werden.

Nachtanteil Variable	< 15%	15 bis 25%	> 25%
Alle	6	6	6
Altersgruppe jung	2	2	5
Altersgruppe mittel	3	1	1
Altersgruppe alt	1	3	0

Tabelle A 7.5: Verteilung der Probanden bezogen auf den Anteil der Nachtfahrten (letzte 12 Monate)

A7.3.2 Statistische Analyse des Parameters Anteil der Nachtfahrten

Die individuellen Mediane der Komplexität aller Probanden gruppiert nach dem Anteil der Nachtfahrten innerhalb der letzten 12 Monate sind in Bild A 7.5 aufgetragen. Die Probanden mit einem Anteil der Nachtfahrten von kleiner 15% befinden sich im linken Bereich des Diagramms, die Probanden mit einem Anteil von 15 bis 25% der Nachtfahrten sind im mittleren Bereich zusammengefasst, im rechten Bereich des Diagramms sind die Probanden mit einem Anteil der Nachtfahrten von größer 25% aufgetragen.

Es ist erkennbar, dass im linken und mittleren Bereich des Diagramms die individuellen Mediane über einen breiteren Bereich streuen, wobei dieser im mittleren Bereich des Diagramms größer ist als im linken Bereich. Im rechten Bereich des Diagramms liegen die individuellen Medianwerte in einem engen Band um den Wert 1,5. Eine mögliche Erklärung liefert die Verteilung der Probanden, bezogen auf die Altersgruppen. (vgl. Tabelle A 7.5) In der Ausprägung größer als 25% (rechter Bereich des Diagramms) befinden sich überwiegend junge Probanden, ältere Probanden sind nicht enthalten. Hingegen ist die Mehrzahl der älteren Probanden in der Ausprägung 15 bis 25% (mittlerer Bereich des Diagramms) vorzufinden, die Mehrzahl der mittleren Probanden befindet sich in der Ausprägung kleiner als 15% (linker Bereich des Diagramms).

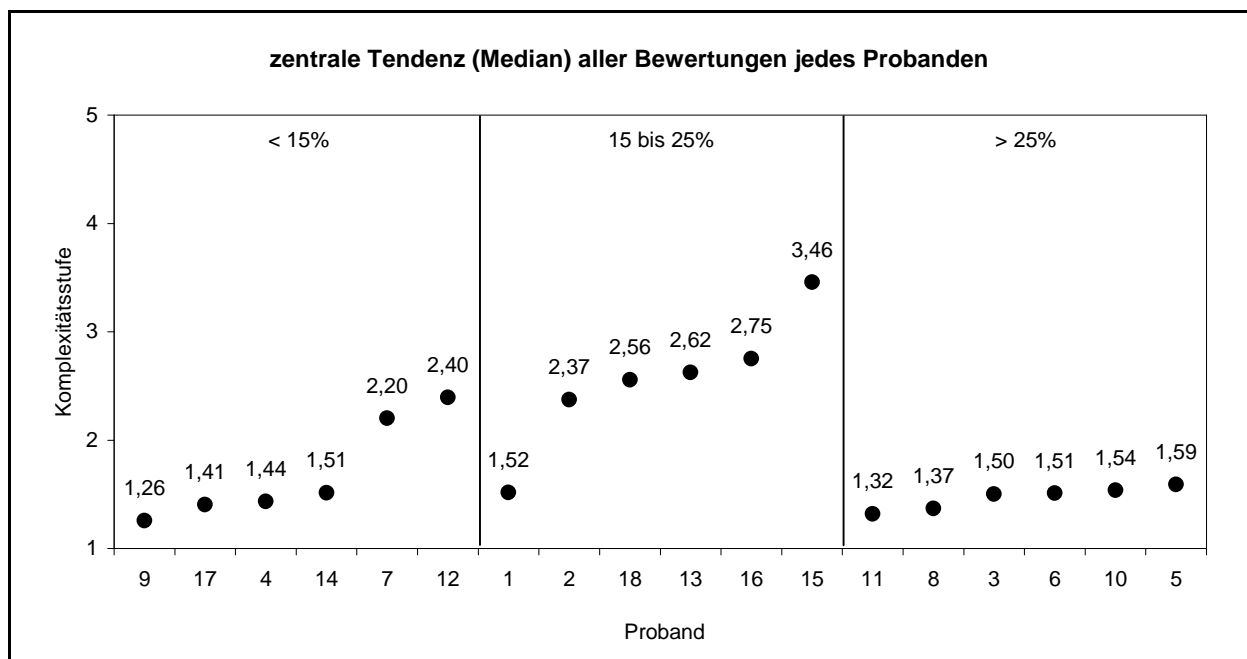


Bild A 7.5: Individuelle Mediane der subjektiv empfundene Komplexität für jeden Probanden – gruppiert nach dem Anteil der Nachtfahrten innerhalb der letzten 12 Monate

Aus den Werten der einzelnen Probanden einer Ausprägung wird die zentrale Tendenz (Mediane) für diese Ausprägung bestimmt. Im folgenden Bild A 7.6 sind die Mediane sowie die Minima und Maxima der drei Ausprägungen dargestellt.

Anhang

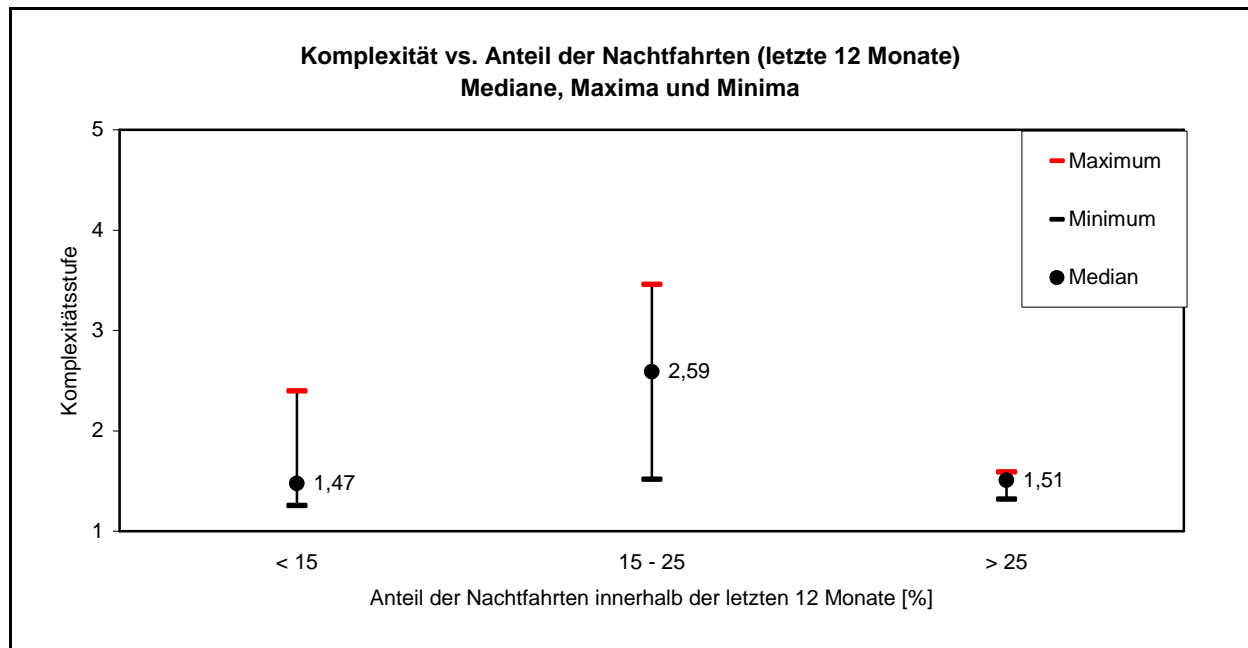


Bild A 7.6: Median, Minimum und Maximum für die drei Ausprägungen des Anteils der Nachtfahrten innerhalb der letzten 12 Monaten

Die Lage der Mediane spiegelt einen ähnlichen Verlauf wider, wie bereits beim Einfluss der Fahrleistung erkennbar. Zunächst steigt die Bewertung der subjektiv empfundenen Komplexität mit zunehmendem Anteil an, danach sinkt sie mit weiter zunehmendem Anteil wieder ab. Probanden der ersten und der dritten Ausprägung bewerten die Szenarien annähernd gleich. Im Vergleich dazu bewerten die Probanden der zweiten Ausprägung die Szenarien um ca. 1,0 Komplexitätsstufen höher. Diese Verteilung war zu erwarten, da die Parameter Fahrleistung und Anteil der Nachtfahrten einen deutlichen Zusammenhang aufweisen, denn Probanden mit einer hohen Fahrleistung haben mit hoher Wahrscheinlichkeit auch einen hohen Anteil an Nachtfahrten und umgekehrt. Aufgrund der Lage der Mediane wird zwischen dem Anteil der Nachtfahrten und der subjektiv empfundenen Komplexität kein unmittelbarer Zusammenhang vermutet. Es lassen sich die folgenden zwei Hypothesen formulieren, die Nullhypothese (H0) und die Alternativhypothese (H1).

- H0:** Die drei Ausprägungen des Anteils der Nachtfahrten haben hinsichtlich der subjektiv empfundenen Komplexität die gleiche zentrale Tendenz.
- H1:** Die drei Ausprägungen des Anteils der Nachtfahrten haben hinsichtlich der subjektiv empfundenen Komplexität nicht die gleiche zentrale Tendenz; sie unterscheiden sich signifikant.

Ob die Nullhypothese zugunsten der Alternativhypothese verworfen werden kann oder nicht, wird anhand des H-Tests nach Kruskal und Wallis geprüft. (vgl. Kapitel A7.2.2) In Tabelle A 7.6 sind die Ergebnisse dieses Tests aufgezeigt. Für die Prüfgröße Chi-Quadrat konnte ein Wert von 8,503 ermittelt werden. Der kritische Chi-Quadrat-Wert für zwei Freiheitsgrade (df) auf dem Signifikanzniveau $p \leq 0,05$ beträgt 5,991. Der ermittelte Wert übersteigt den kritischen Tabellenwert. Demnach unterscheiden sich die drei Stichproben hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz auf dem

gewählten Signifikanzniveau signifikant voneinander. Die Nullhypothese kann zugunsten der Alternativhypothese verworfen werden.

Signifikanztest: H-Test nach Kruskal und Wallis	
Chi-Quadrat _(berechnet)	8,503
Chi-Quadrat _(kritischer Tabellenwert) (für $p \leq 0,05$, $df = 2$)	5,991
Bedingung: Chi-Quadrat _(berechnet) > Chi-Quadrat _(kritischer Tabellenwert)	erfüllt
Die Nullhypothese ist zugunsten der Alternativhypothese zu verwerfen.	

Tabelle A 7.6: Ergebnis des Signifikanztests der Gleichheit der Mediane je Ausprägung des Anteils der Nachtfahrten

Auch für den Einfluss dieses Parameters wird nun anhand eines paarweisen Vergleichs geprüft, welche der drei Stichproben sich im Einzelnen signifikant voneinander unterscheiden. Dieser Vergleich erfolgt aufgrund des Ordinalniveaus der Variablen anhand des U-Tests von Mann und Whitney. (vgl. Kapitel A7.1.2) Die berechneten U-Werte, der kritische U-Wert auf dem Signifikanzniveau $p \leq 0,05$ und die Ergebnisse des Signifikanztests der drei paarweisen Vergleiche sind in folgender Tabelle A 7.7 zusammengefasst.

Für den ersten und den dritten Vergleich ergibt sich, dass sich beide Stichproben der Ausprägungen kleiner als 15% und 15 bis 25% sowie 15 bis 25% und größer als 25% signifikant voneinander unterscheiden. Beim zweiten Vergleich ist kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Stichproben der Ausprägungen kleiner als 15% und größer als 25% nachweisbar.

Signifikanztest: U-Test von Mann und Whitney			
paarweiser Vergleich	Prüfgröße U	$U_{krit} (p \leq 0,05, n_1 = 6, n_2 = 6)$	Bedingung: $U \leq U_{krit}$
< 15% vs. 15 bis 25%	3,00	5,00	erfüllt
< 15% vs. > 25%	16,00		nicht erfüllt
15 bis 25% vs. > 25%	2,00		erfüllt

Tabelle A 7.7: Ergebnisse der paarweisen Vergleiche zwischen den Ausprägungen des Anteils der Nachtfahrten

A7.3.3 Diskussion der Ergebnisse

Die statistische Analyse ergibt, dass sich die drei Stichproben hinsichtlich der zentralen Tendenz signifikant voneinander unterscheiden. Es wird allerdings davon ausgegangen, dass es sich hierbei nur um ein statistisches Ergebnis handelt und dass dieser Unterschied andere Ursachen hat. Die wichtigste Erklärung dieses Ergebnisses ist die Verteilung der Probanden innerhalb der drei Ausprägungen. (vgl. Tabelle A 7.5) In der ersten Ausprägung sind überwiegend Probanden der Altersgruppe mittel, in der zweiten Ausprägung sind vermehrt Probanden der Altersgruppe alt und in der dritten Ausprägung sind fast ausschließlich junge Probanden vertreten. Auch

Anhang

anhand der Ergebnisse des paarweisen Vergleichs kann der Einfluss der Altersgruppe gesehen werden. (vgl. Ergebnisse in Kapitel 5.5.2)

Interessant ist die Analyse dieses Parameters innerhalb jeder Altersgruppe. Es wird vermutet, dass die Probanden mit einem hohen Anteil an Nachtfahrten die Komplexität geringer bewerten, da sie auf einen größeren Erfahrungsschatz (bezogen auf Fahrten bei Dunkelheit) zurückgreifen können. Dabei ist sehr interessant zu analysieren, in wie weit die älteren Probanden mit diesem Erfahrungsschatz die altersbedingten Einschränkungen kompensieren können. Im Rahmen dieser Arbeit lagen dafür aber zu geringe Stichproben vor, so dass eine statistische Analyse mit abgesicherten Ergebnissen nicht erfolgen kann. Daher wird vorgeschlagen, diesen Parameter mit einer größeren Anzahl an Probanden nochmals zu untersuchen.

A7.4 Der Einfluss der Wiederholung

A7.4.1 Allgemeines

Alle Probanden, mit Ausnahme von Proband 3, nahmen an zwei Untersuchungstagen teil. An jedem dieser Untersuchungstage wurden jeweils zwei durch Pausen getrennte Untersuchungsdurchgänge durchgeführt. Dabei wurde in jedem Untersuchungsdurchgang jedes der 101 Szenarien zweimal präsentiert, so dass für die Auswertung jedes Szenarios acht Bewertungen der Komplexität vorliegen. Im Folgenden wird analysiert, in wie weit die Wiederholung des Szenarios Einfluss auf die subjektiv empfundene Komplexität nimmt. Zum Einen können daraus Rückschlüsse auf die Gleichmäßigkeit der Untersuchung gezogen werden. Zum Anderen wird deutlich, ob die „Bekanntheit“ der Szenarien einen Einfluss auf die subjektiv empfundene Komplexität ausübt.

Da dieser Zusammenhang eher informativ die Qualität der Untersuchung widerspiegelt, werden die statistischen Analysen nur für gesamte Probandenkollektiv ohne Berücksichtigung der fahrerspezifischen Merkmale durchgeführt..

A7.4.2 Statistische Analyse des Parameters Wiederholung

Die individuellen Mediane aller Probanden gruppiert nach den vier Durchgängen sind in den folgenden vier Bildern (Bild A7.7, Bild A7.8, Bild A7.9 und Bild A7.10) zusammengefasst. Aus den Werten der einzelnen Probanden wird die zentrale Tendenz (Mediane) für jeden Durchgang bestimmt. In Bild A 7.11 sind die Mediane sowie die Minima und Maxima jedes Durchgangs dargestellt.

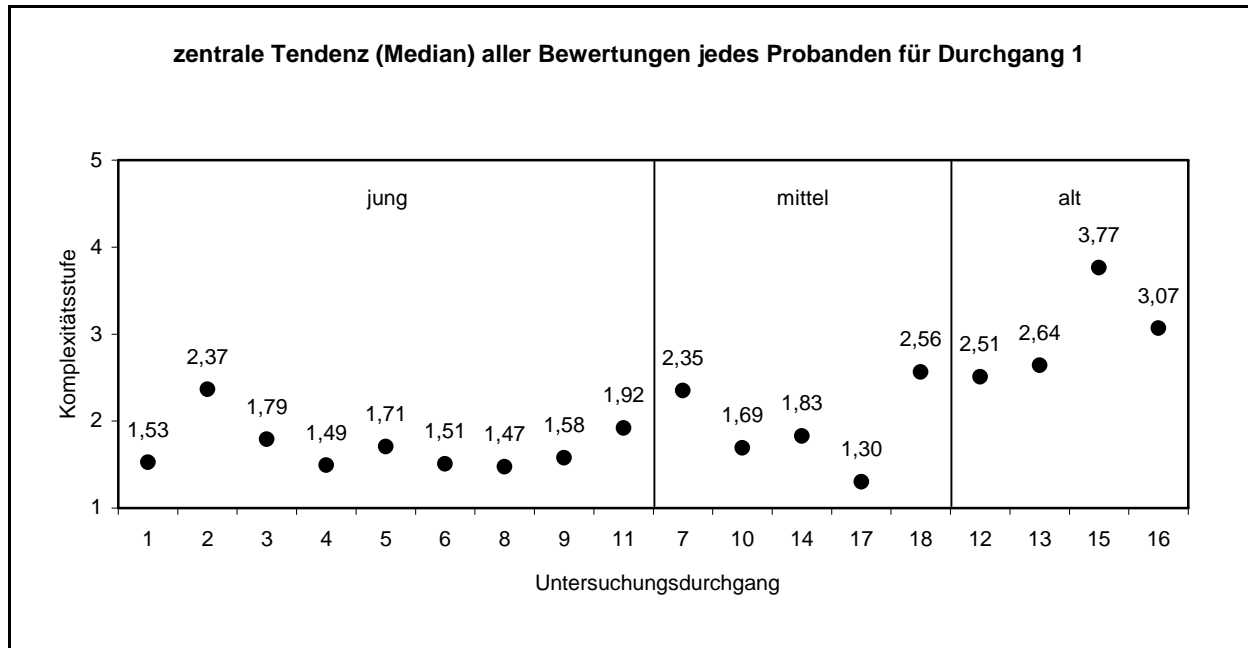


Bild A7.7: Subjektiv empfundene Komplexität (zentrale Tendenz) für jeden Probanden - Durchgang 1

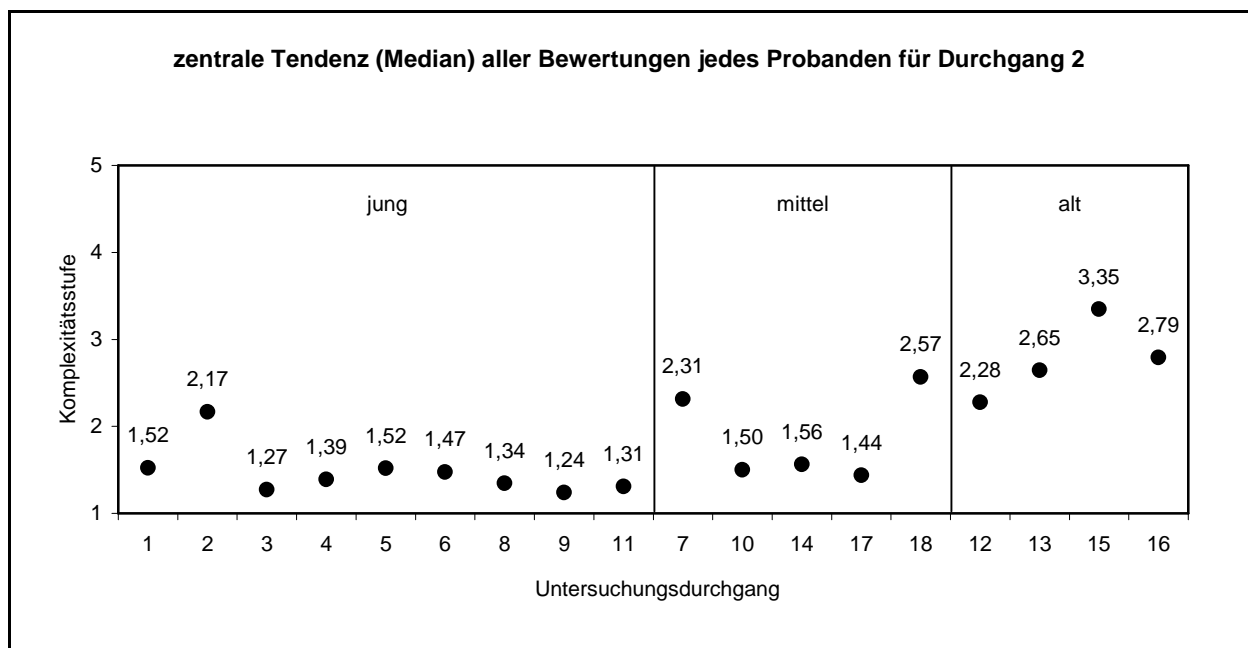


Bild A7.8: Subjektiv empfundene Komplexität (zentrale Tendenz) für jeden Probanden - Durchgang 2

Anhang

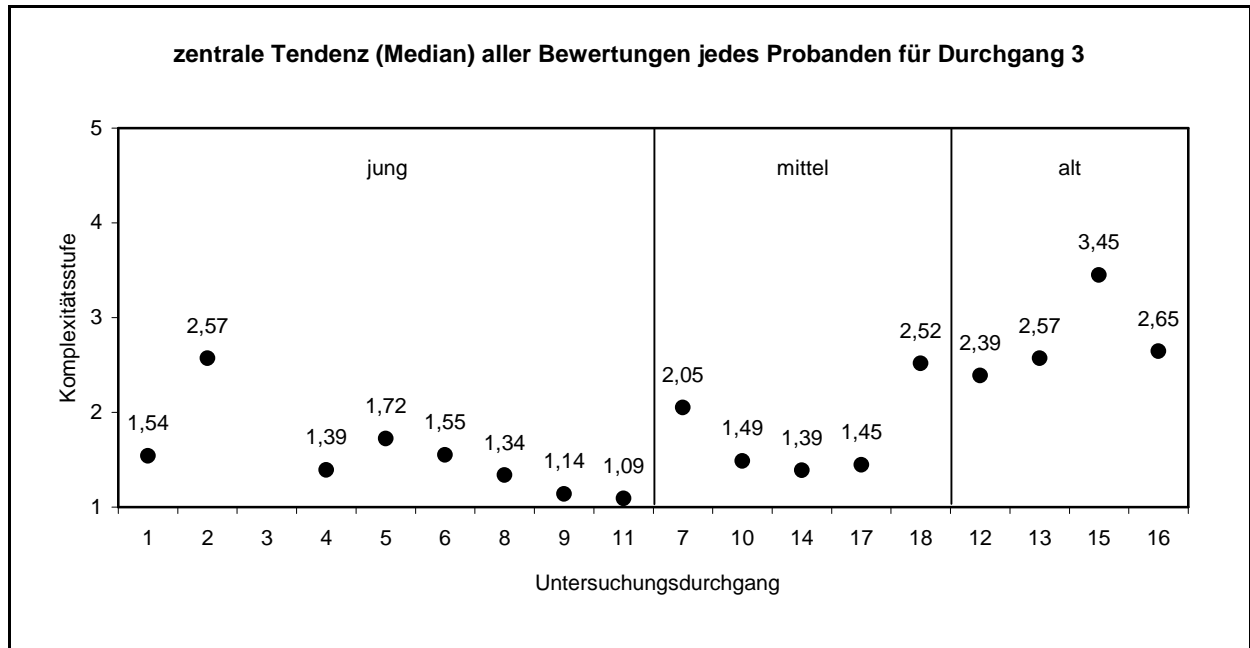


Bild A7.9: Subjektiv empfundene Komplexität (zentrale Tendenz) für jeden Probanden – Durchgang 3

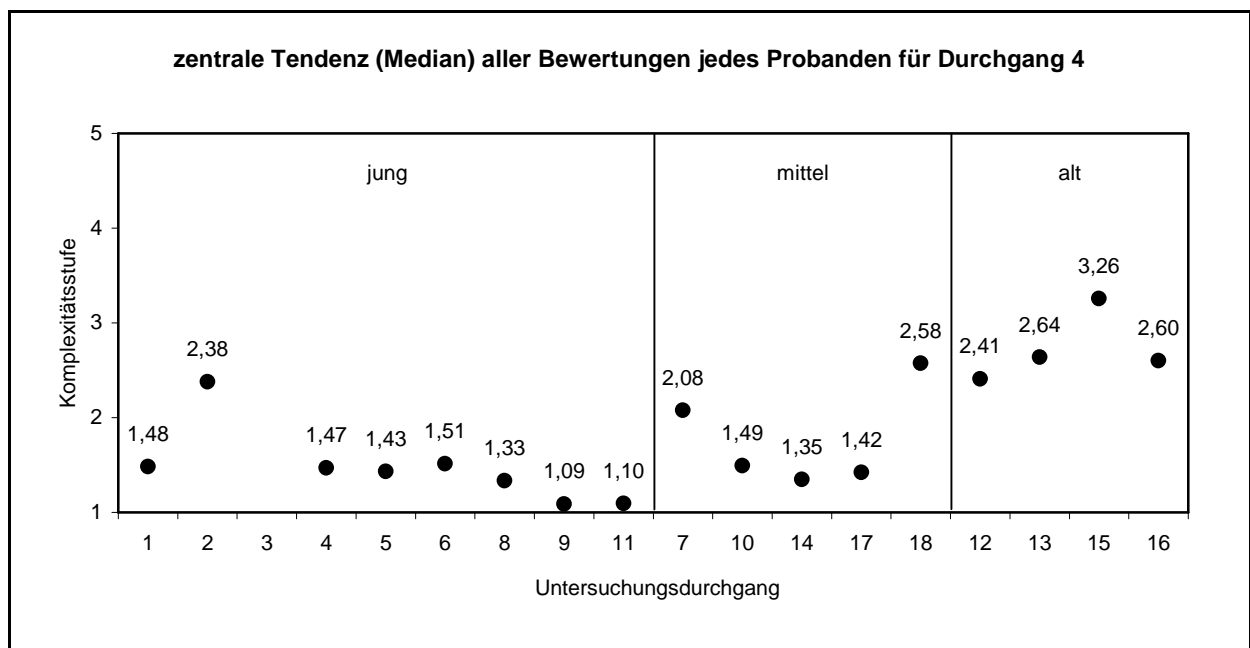


Bild A7.10: Subjektiv empfundene Komplexität (zentrale Tendenz) für jeden Probanden – Durchgang 4

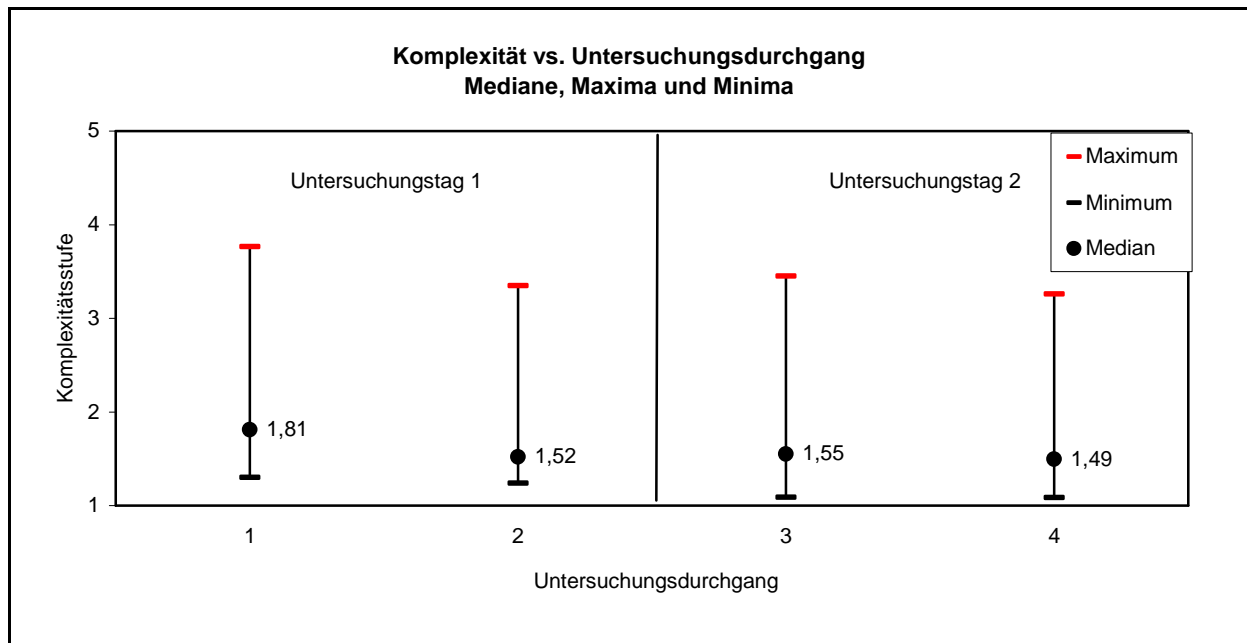


Bild A 7.11: Median, Minimum und Maximum für jede Wiederholung

Die Durchgänge 1 und 2 präsentieren den ersten Untersuchungstag, die Durchgänge 3 und 4 den zweiten Untersuchungstag. Beim Vergleich der Lage der Mediane des ersten Untersuchungstages wird deutlich, dass im zweiten Durchgang die Szenarien weniger komplex eingestuft werden als im ersten Durchgang, wobei die Differenz nur 0,3 Komplexitätsstufen beträgt. Am zweiten Untersuchungstag beträgt die Differenz zwischen den beiden Durchgängen nur noch 0,06. Aufgrund der Lage der Mediane wird zwischen den Durchgängen und der subjektiv empfundenen Komplexität ein Zusammenhang vermutet. Es lassen sich die folgenden zwei Hypothesen formulieren, die Nullhypothese (H0) und die Alternativhypothese (H1).

- H0:** Die vier Durchgänge haben hinsichtlich der subjektiv empfundenen Komplexität die gleiche zentrale Tendenz.
- H1:** Die vier Durchgänge haben hinsichtlich der subjektiv empfundenen Komplexität nicht die gleiche zentrale Tendenz; sie unterscheiden sich signifikant.

Anhand des Tests auf signifikante Unterschiede wird überprüft, ob sich die vier Mediane signifikant voneinander unterscheiden und ob somit die Nullhypothese zugunsten der Alternativhypothese zu verwerfen ist. Die untersuchten Variablen (Untersuchungsdurchgang, Komplexitätsbewertung) weisen Ordinalniveau auf, die Anzahl der Stichproben ist größer als zwei und die Stichproben sind abhängig voneinander. Abhängig bedeutet, dass die subjektiv empfundene Komplexität der Szenarien bei jedem Probanden zu mehreren Zeitpunkten erhoben wurde. Demnach wird der Friedman-Test herangezogen. Die Prüfgröße für diesen Test ist Chi-Quadrat. Das berechnete Chi-Quadrat wird mit dem kritischen Chi-Quadrat aus der Prüftabelle verglichen. Ist das berechnete Chi-Quadrat (Prüfgröße) größer als das kritische Chi-Quadrat, liegt Signifikanz auf dem entsprechenden Niveau vor. [ZÖFEL, 2002]

Anhang

In Tabelle A 7.8 ist das Ergebnis des Friedman-Tests dargestellt. Für die Prüfgröße Chi-Quadrat konnte ein Wert von 9,918 ermittelt werden. Der kritische Chi-Quadrat-Wert für drei Freiheitsgrade (df) auf dem Signifikanzniveau $p \leq 0,05$ beträgt 7,815. Der ermittelte Chi-Quadrat-Wert übersteigt den kritischen Tabellenwert. Demnach unterscheiden sich die Mediane der vier Stichproben hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz auf dem gewählten Signifikanzniveau signifikant voneinander. Die Nullhypothese ist zugunsten der Alternativhypothese zu verwerfen.

Signifikanztest: Friedmann-Test	
Chi-Quadrat _(berechnet)	9,918
Chi-Quadrat _(kritischer Tabellenwert) (für $p \leq 0,05$, $df = 3$)	7,815
Bedingung: Chi-Quadrat _(berechnet) > Chi-Quadrat _(kritischer Tabellenwert)	erfüllt
Die Nullhypothese ist zugunsten der Alternativhypothese zu verwerfen.	

Tabelle A 7.8: Ergebnis des Signifikanztests der Gleichheit der Mediane je Untersuchungsdurchgang

Auch für den Einfluss dieses Parameters wird nun anhand eines paarweisen Vergleichs geprüft, welche der vier Stichproben sich im Einzelnen signifikant voneinander unterscheiden. Der Vergleich erfolgt aufgrund des Ordinalniveaus der Variablen und der Abhängigkeit der Stichproben anhand des Wilcoxon-Tests. Die Prüfgröße für diesen Test ist der T-Wert. Der berechnete T-Wert wird mit dem kritischen T-Wert aus der Prüftabelle zu einem gewählten Signifikanzniveau verglichen. Ist der berechnete T-Wert kleiner oder gleich dem kritischen T-Wert, so liegt Signifikanz auf dem entsprechenden Niveau vor und die beiden Stichproben unterscheiden sich signifikant voneinander. [ZÖFEL, 2002]

Die berechneten T-Werte, die kritischen T-Werte auf dem Signifikanzniveau $p \leq 0,05$ und die Ergebnisse des Signifikanztests der paarweisen Vergleiche sind in Tabelle A 7.9 zusammengefasst. Der Vergleich der T-Werte zeigt, dass auf dem gewählten Signifikanzniveau für den ersten Vergleich (Durchgang 1 vs. Durchgang 2) ein signifikanter Unterschied ermittelt werden konnte. Für den zweiten (Durchgang 2 vs. Durchgang 3) und dritten Vergleich (Durchgang 3 vs. Durchgang 4) ist kein signifikanter Unterschied auf dem gewählten Signifikanzniveau nachweisbar.

Signifikanztest: Wilcoxon-Test			
paarweiser Vergleich	Prüfgröße T	$T_{krit} (p \leq 0,05)$	Bedingung: $T \leq T_{krit}$
Durchgang 1 vs. Durchgang 2	13,00	40,00 (n = 18)	erfüllt
Durchgang 2 vs. Durchgang 3	69,00	34,00 (n = 17)	<u>nicht</u> erfüllt
Durchgang 3 vs. Durchgang 4	53,00		<u>nicht</u> erfüllt

Tabelle A 7.9: Komplexität vs. Wiederholung - Ergebnisse der paarweisen Vergleiche zwischen den Ausprägungen

A7.4.3 Diskussion der Ergebnisse

Die statistische Analyse zeigt, dass sich die Mediane der vier Stichproben hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz signifikant voneinander unterscheiden. Somit ist die Nullhypothese zugunsten der Alternativhypothese zu verwerfen. Der paarweise Vergleich macht deutlich, dass insbesondere zwischen den Durchgängen des ersten Untersuchungstages (1, 2) ein signifikanter Unterschied besteht, wobei die Differenz zwischen den Medianen beider Durchgänge weniger als 0,3 Komplexitätsstufen beträgt. Zwischen den Durchgängen 2 und 3 und zwischen den Durchgängen des zweiten Untersuchungstages (3, 4) besteht kein signifikanter Unterschied. Diese Tendenz ist auf den „Lernprozess“ zurückzuführen. Dieser Lernprozess hat zwei Ursachen, die beide Einfluss auf das Ergebnis nehmen. Eine Ursache ist der Untersuchungsablauf, der anfangs für den Probanden noch neuartig ist und ungewohnt erscheint, durch weitere Durchgänge wird der Proband jedoch geübter. Die andere Ursache liegt darin begründet, dass die Szenarien, welche präsentiert werden, zunächst unbekannt sind aber durch Wiederholung bekannter werden.

Nehmen die Probanden zum ersten Mal an einer für sie unbekannten Untersuchung teil, so wirken die Probanden zunächst unsicher und unerfahren. Insbesondere beim Vergleich der Durchgänge 1 und 2 wird dies deutlich. Im ersten Durchgang bewerten die Probanden die Szenarien um ca. 0,3 Komplexitätsstufen höher als im zweiten Durchgang. Werden die Untersuchungen jedoch weiter wiederholt, wird angenommen, dass die Probanden erfahrener und geübter im Umgang mit der Untersuchung werden. Bereits nach dem zweiten Untersuchungsdurchgang scheint für das gesamte Probandenkollektiv im Vergleich zu den folgenden der „Lernprozess“ aus statistischer Sicht abgeschlossen. Die Probanden wissen, welche Aufgabe sie lösen müssen und fühlen sich sicherer. Das wird auch beim Vergleich der Durchgänge 2, 3 und 4 sehr deutlich. Die Differenzen zwischen diesen Durchgängen liegen bei weniger als 0,1 Komplexitätsstufen. Es wird angenommen, dass diese Differenzen überwiegend auf subjektive psychologische Einflüsse, wie beispielsweise Motivation, Belastung, Müdigkeit usw. zurückzuführen sind. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit kann nicht geklärt werden, welcher dieser beiden Parameter (Lernprozess oder psychologische Einflüsse) den größeren Einfluss auf das Ergebnis hat. Es ist davon auszugehen, dass die Geschwindigkeit des Lernprozesses für jeden einzelnen Probanden individuell ist, ebenso das Auftreten der

Anhang

psychologischen Einflüsse. Daher beruhen alle bisher beschriebenen statistischen Auswertungen dieser Arbeit auf den Daten aller vier Durchgänge.

Eine Gewöhnung der Probanden an die Szenarien wird nicht angenommen: Werden Szenarien zum ersten Mal präsentiert, so sind deren Informationen zunächst unbekannt und der Proband versucht diese Informationen vollständig zu erfassen. Aufgrund der vielen neuen Informationen empfindet er daher die Komplexität des Szenarios höher. Werden diese Szenarien allerdings mehrmals wiederholt, steigt zwar deren Bekanntheitsgrad an, jedoch wurden die 101 Szenarien den Probanden nur für 3 Sekunden präsentiert. Aufgrund dieser kurzen Präsentationszeit und der Vielzahl an unterschiedlichen Szenarien, wird der Einfluss der Bekanntheit der Szenarien auf die subjektiv empfundene Komplexität als eher gering eingeschätzt. Demnach wird davon ausgegangen, dass die Art des Untersuchungsablaufs den größeren Einfluss auf die Bewertung der subjektiv empfundenen Komplexität nimmt. Der Einfluss der Bekanntheit der Szenarien spielt nur eine untergeordnete Rolle.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Untersuchung bezogen auf die Lage der Mediane einen sehr gleichmäßigen Verlauf aufzeigt. Hat der Proband seine anfängliche Unsicherheit überwunden, werden die Szenarien sehr gleichmäßig bewertet.

A7.5 Ergänzende Daten zum Parameter Kategorie

A7.5.1 Mediane aller Probanden getrennt nach Kategorie

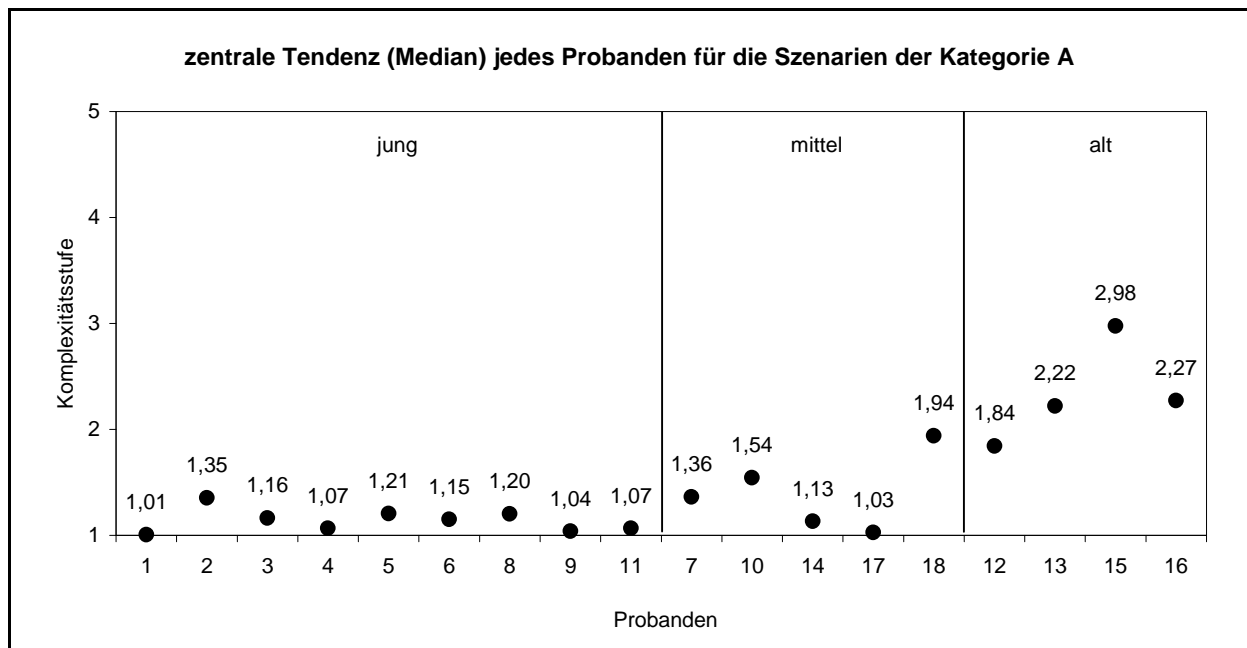


Bild A7.12: Subjektiv empfundene Komplexität (zentrale Tendenz) für jeden Probanden - Kategorie A

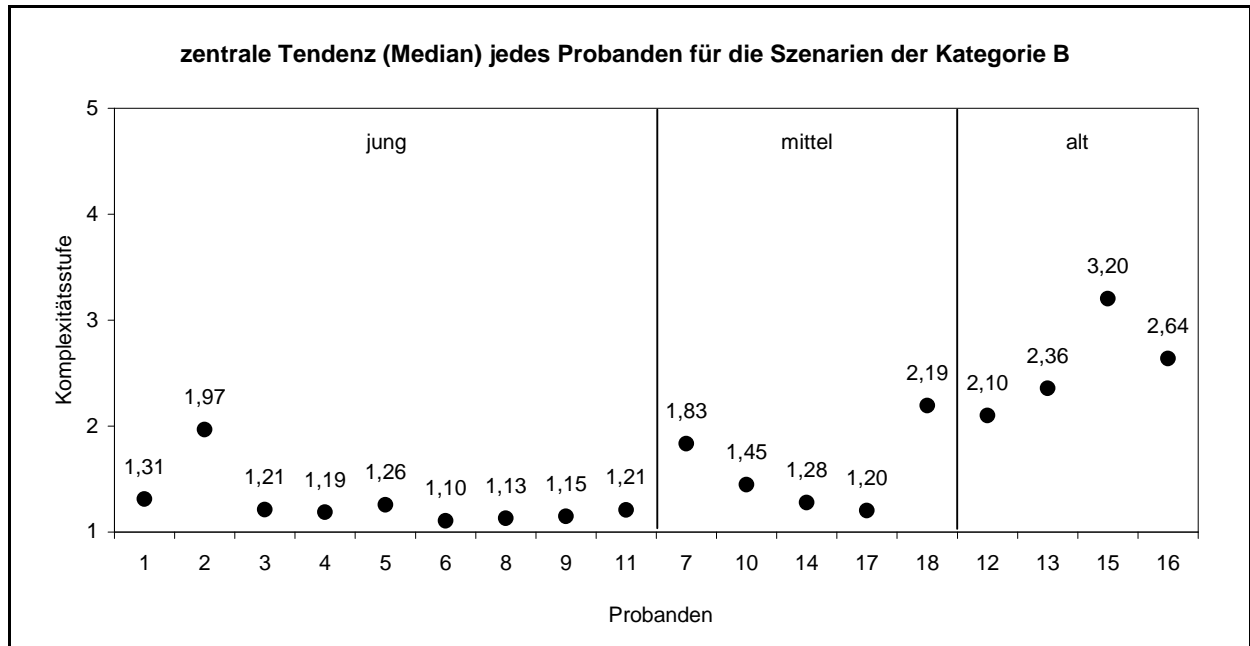


Bild A7.13: Subjektiv empfundene Komplexität (zentrale Tendenz) für jeden Probanden – Kategorie B

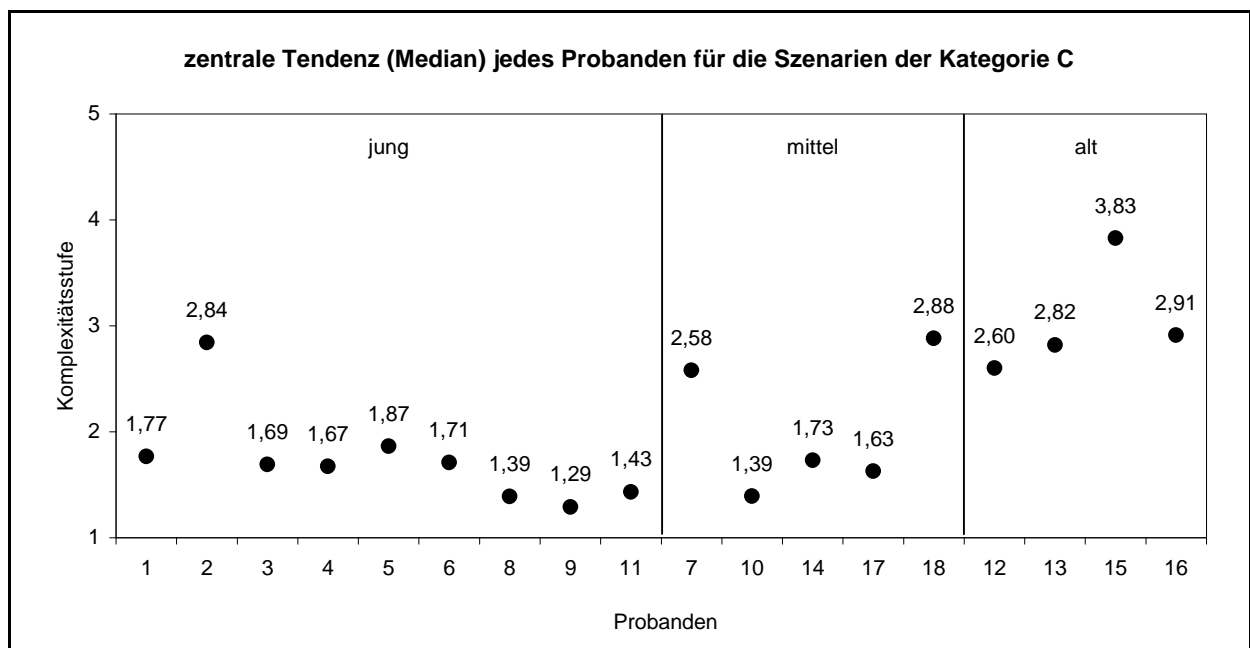


Bild A7.14: Subjektiv empfundene Komplexität (zentrale Tendenz) für jeden Probanden – Kategorie C

Anhang

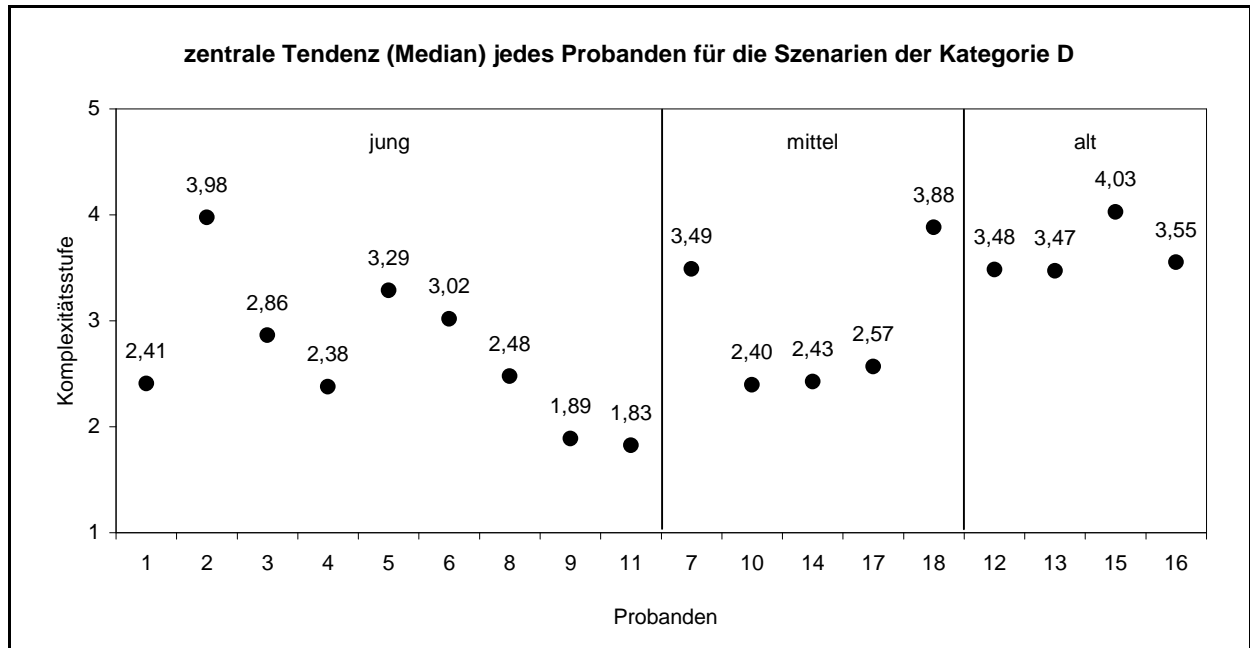


Bild A7.15: Subjektiv empfundene Komplexität (zentrale Tendenz) für jeden Probanden – Kategorie D

A8 Daten für die Auswertungen des Untersuchungsabschnitts II

A8.1 Daten der Probanden der Altersgruppe mittel

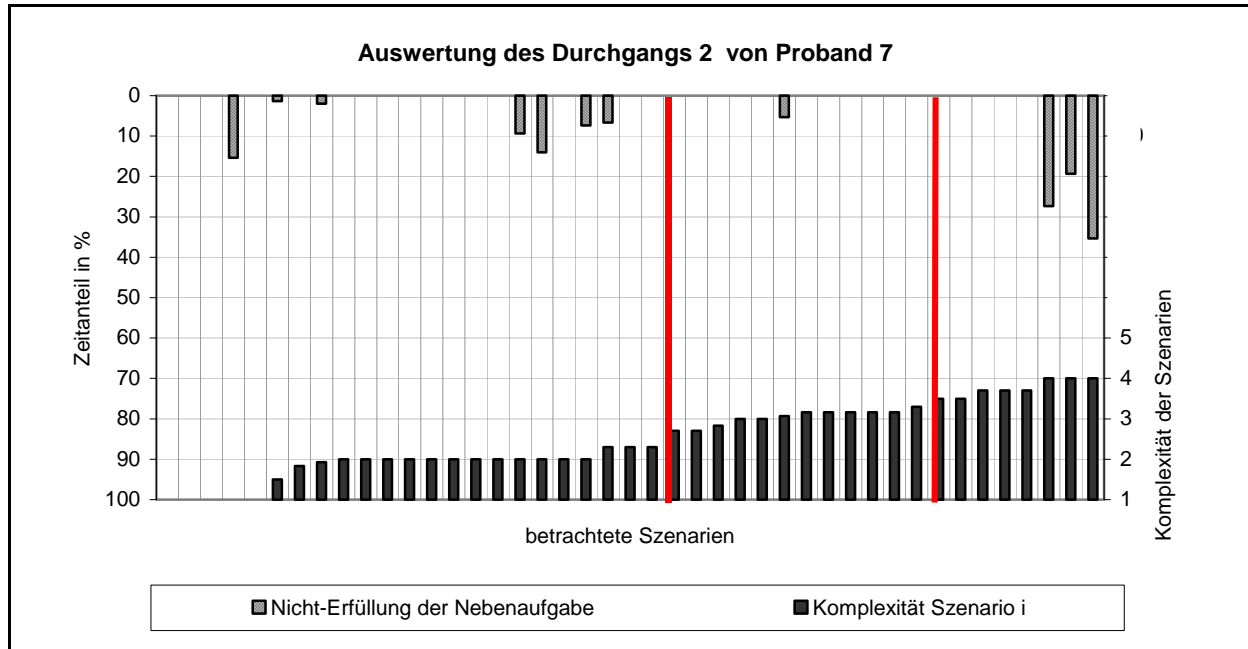


Bild A8.1: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 7, Durchgang 2

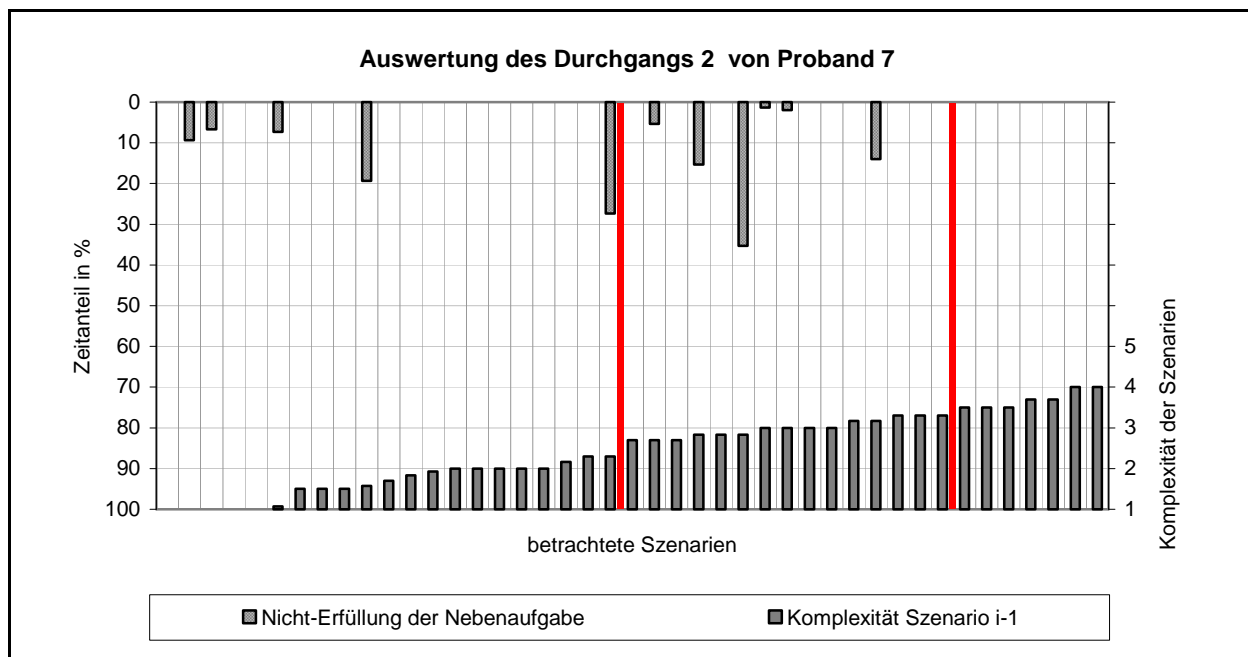


Bild A8.2: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 7, Durchgang 2

Anhang

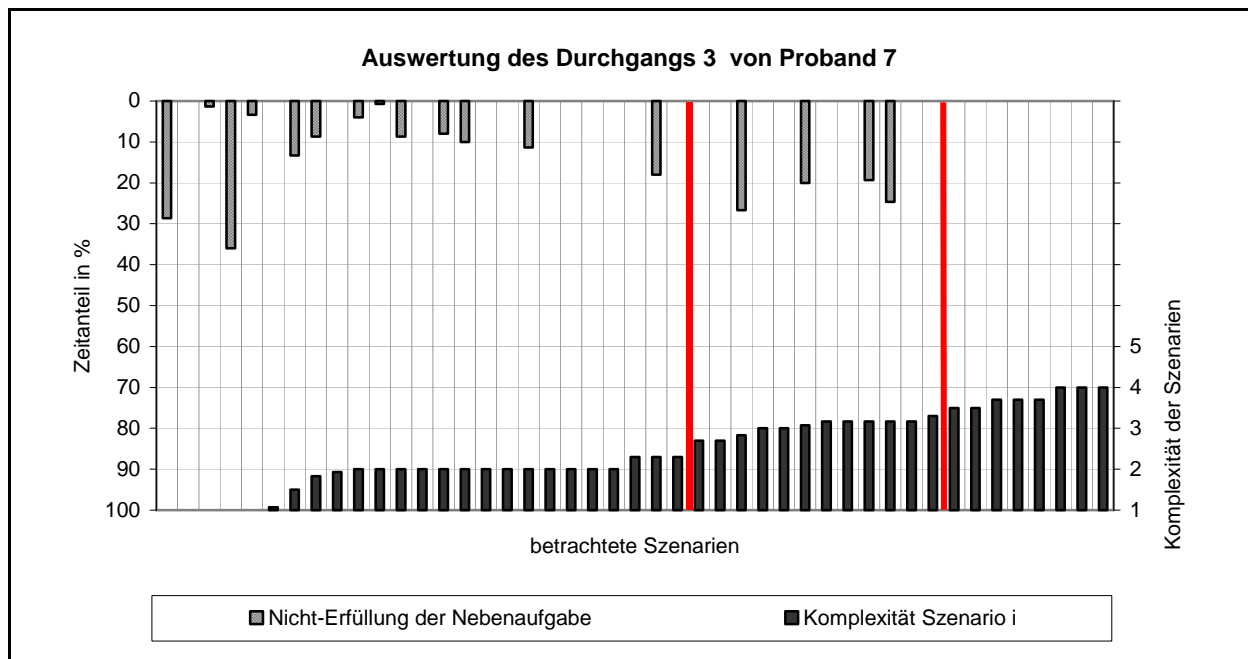


Bild A8.3: Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 7, Durchgang 3

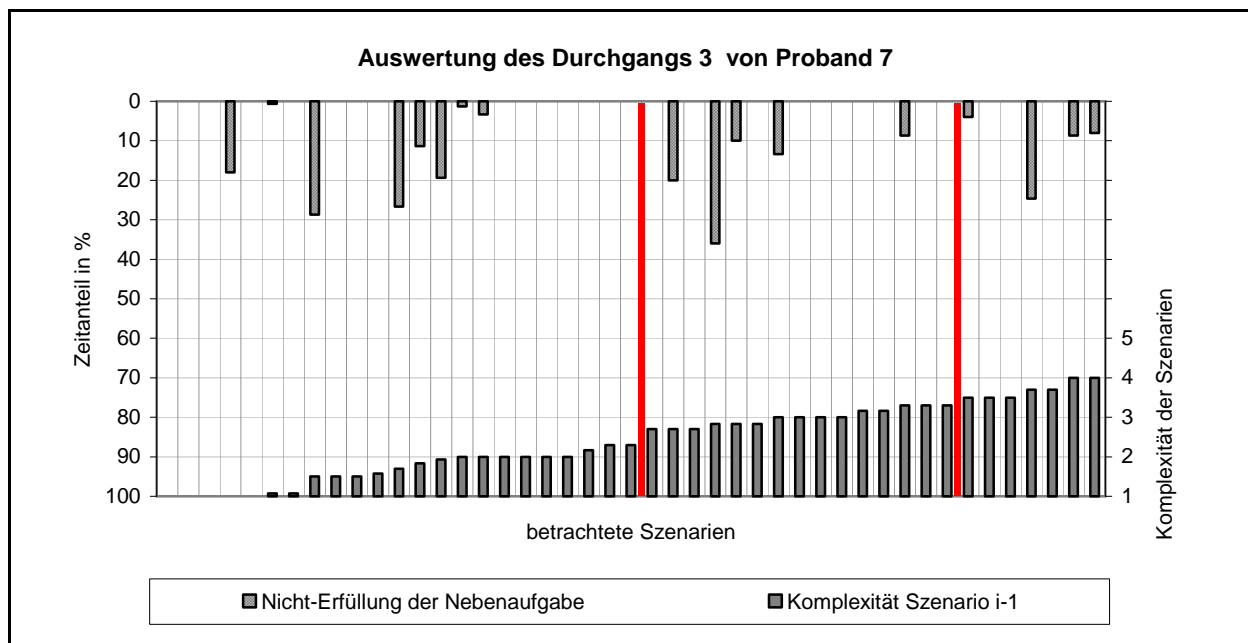


Bild A8.4: Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 7, Durchgang 3

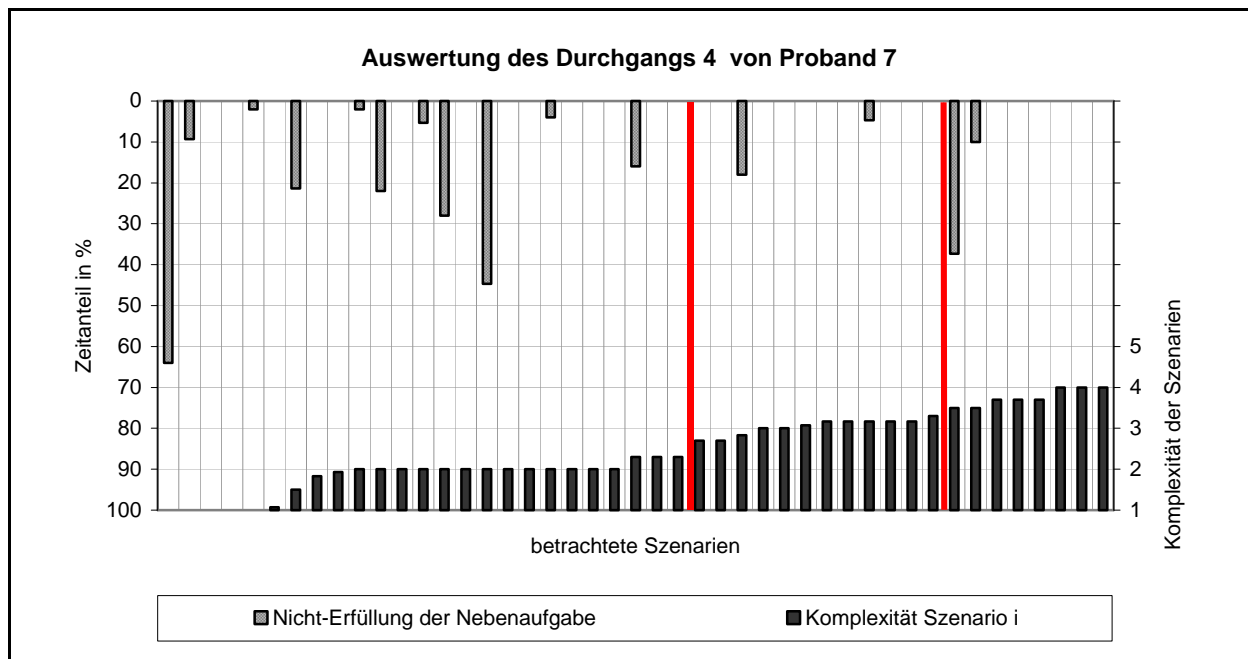


Bild A8.5: **Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 7, Durchgang 4**

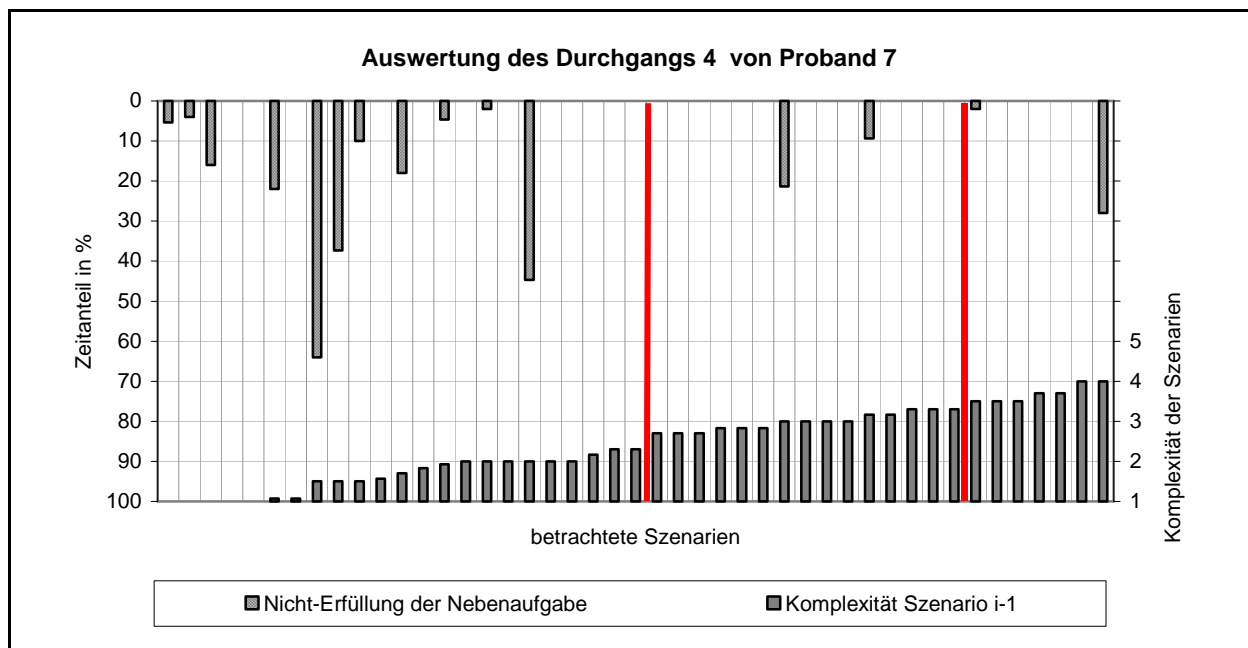


Bild A8.6: **Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 7, Durchgang 4**

Anhang

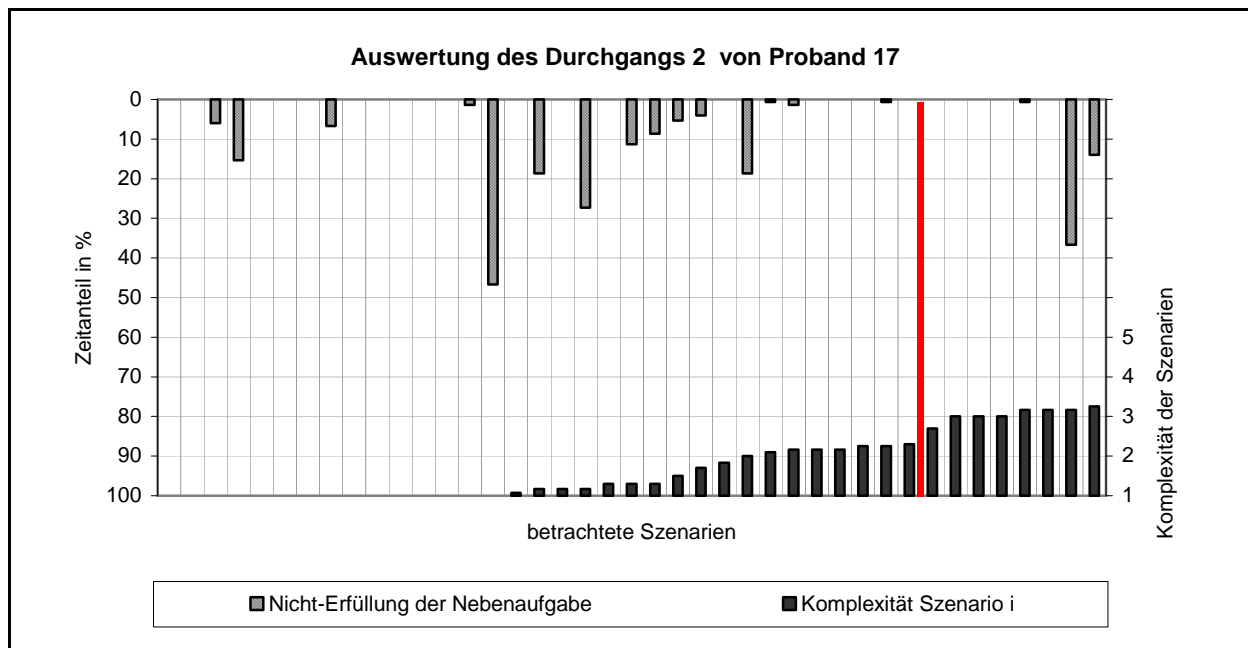


Bild A8.7: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 17, Durchgang 2

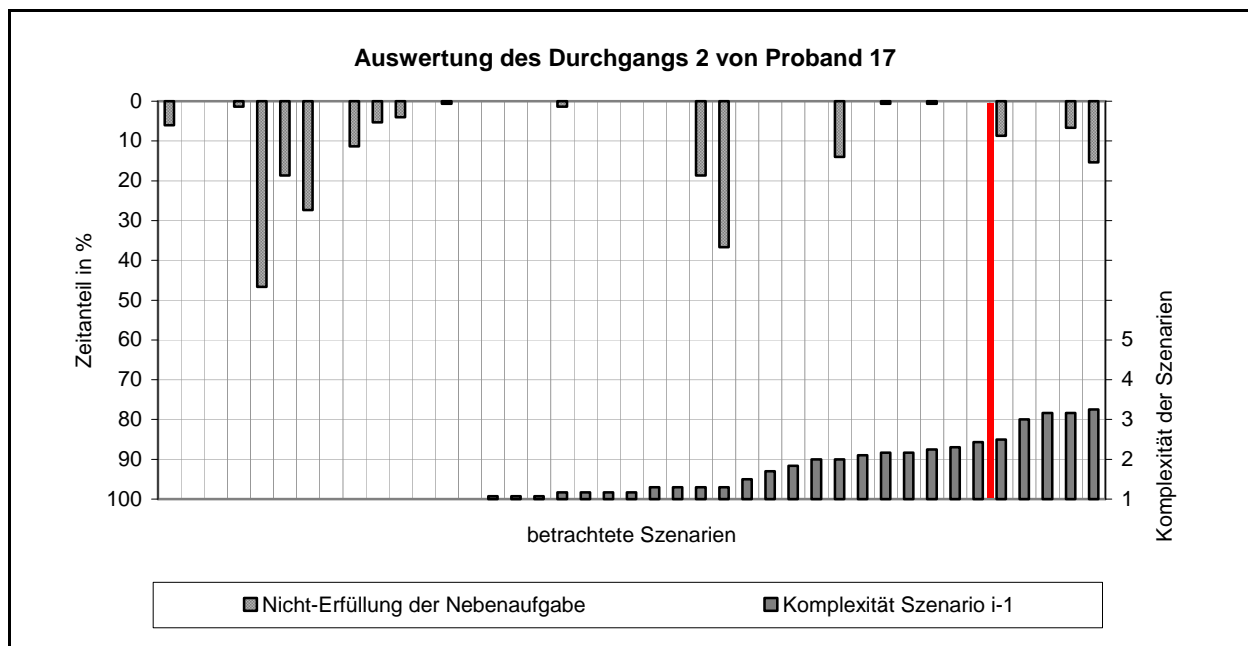


Bild A8.8: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 17, Durchgang 2

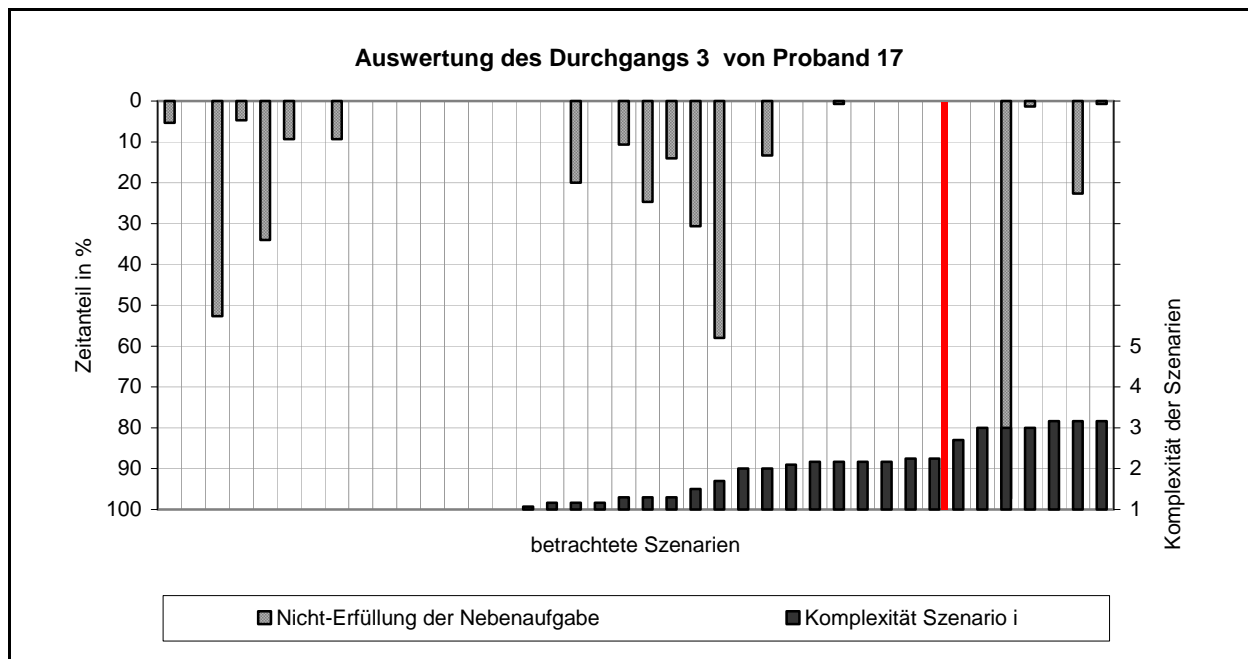


Bild A8.9: Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 17, Durchgang 3

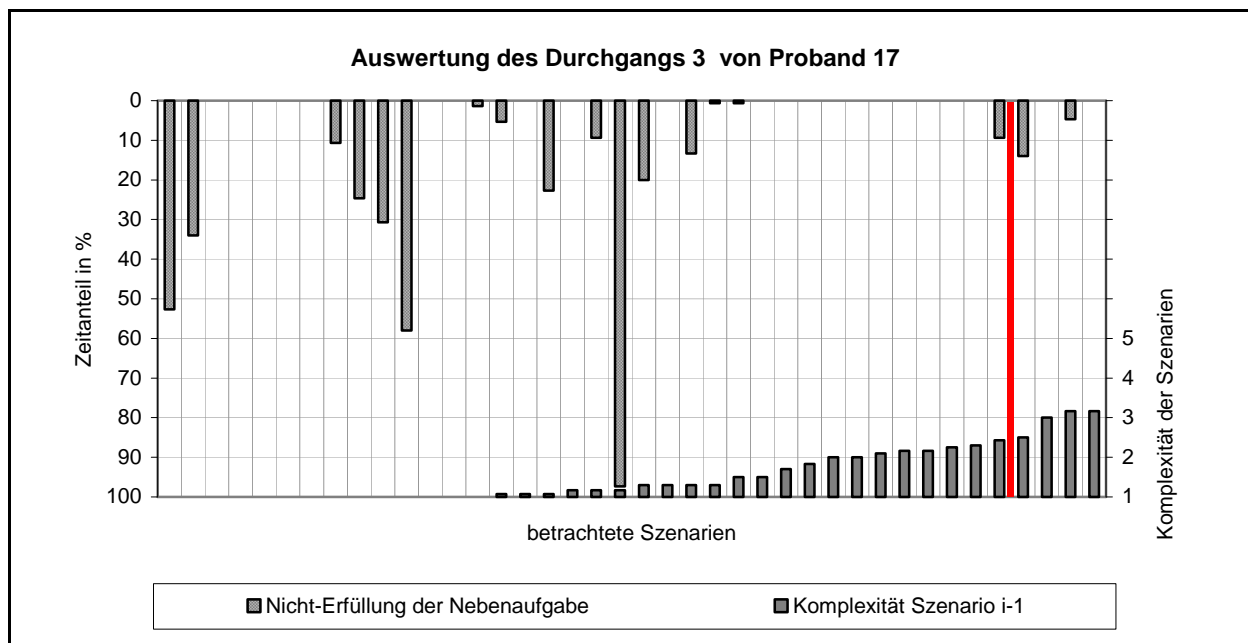


Bild A8.10: Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 17, Durchgang 3

Anhang

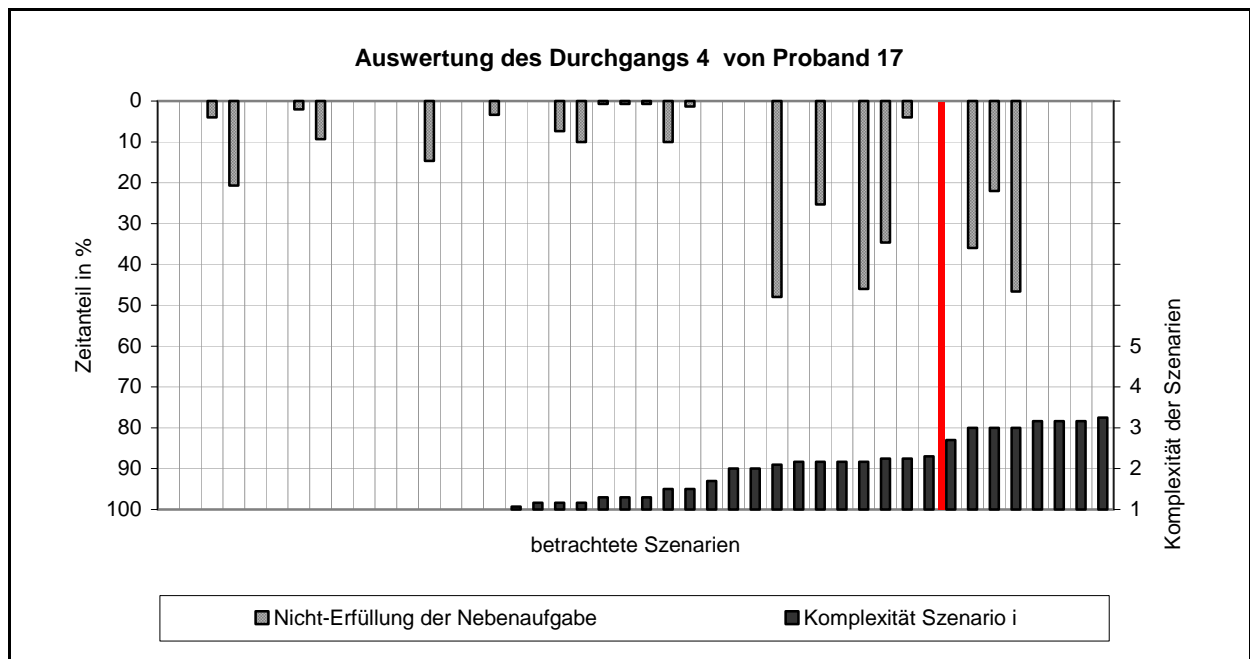


Bild A8.11: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 17, Durchgang 4

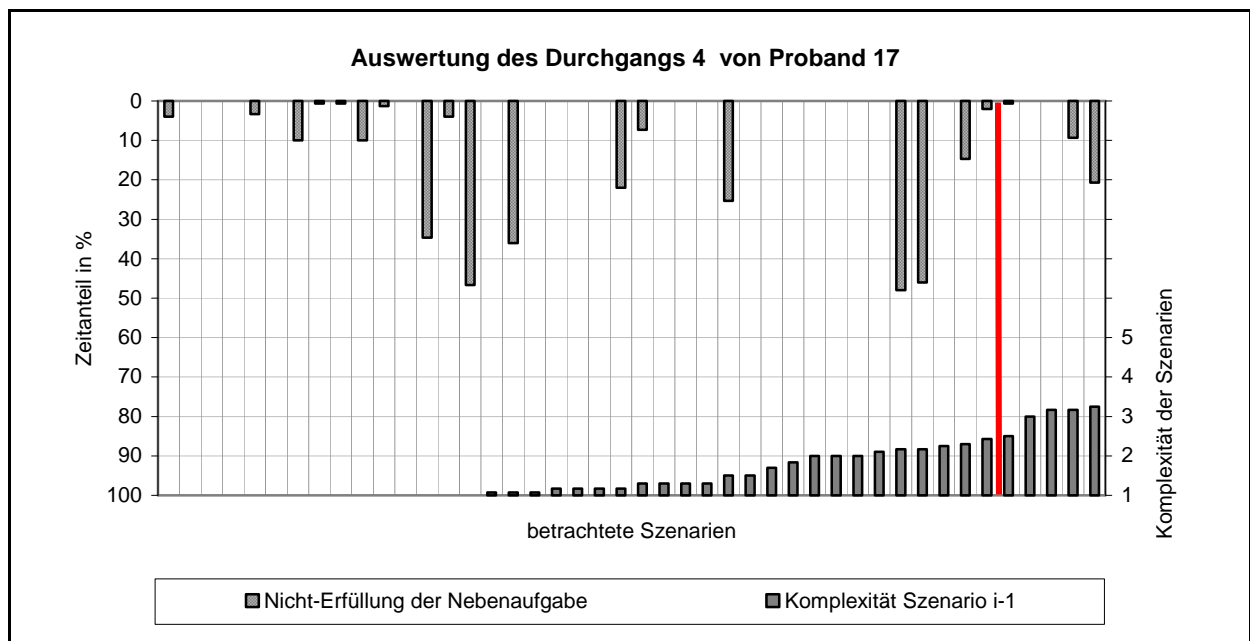


Bild A8.12: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 17, Durchgang 4

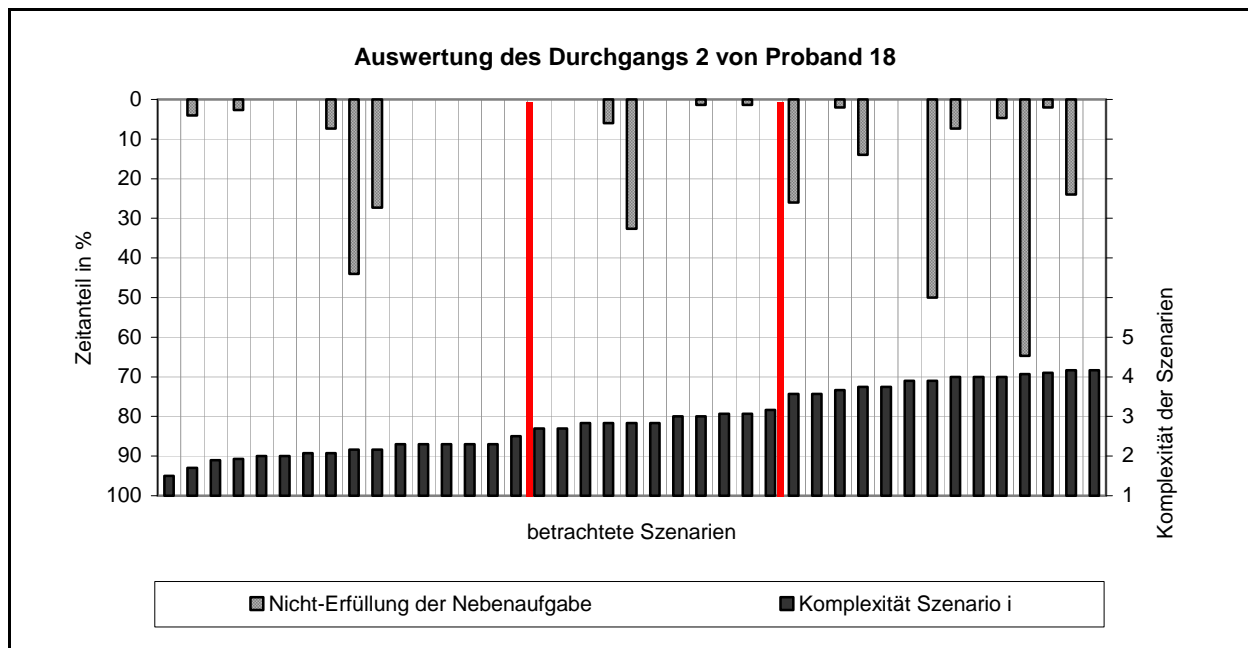


Bild A8.13: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 18, Durchgang 2

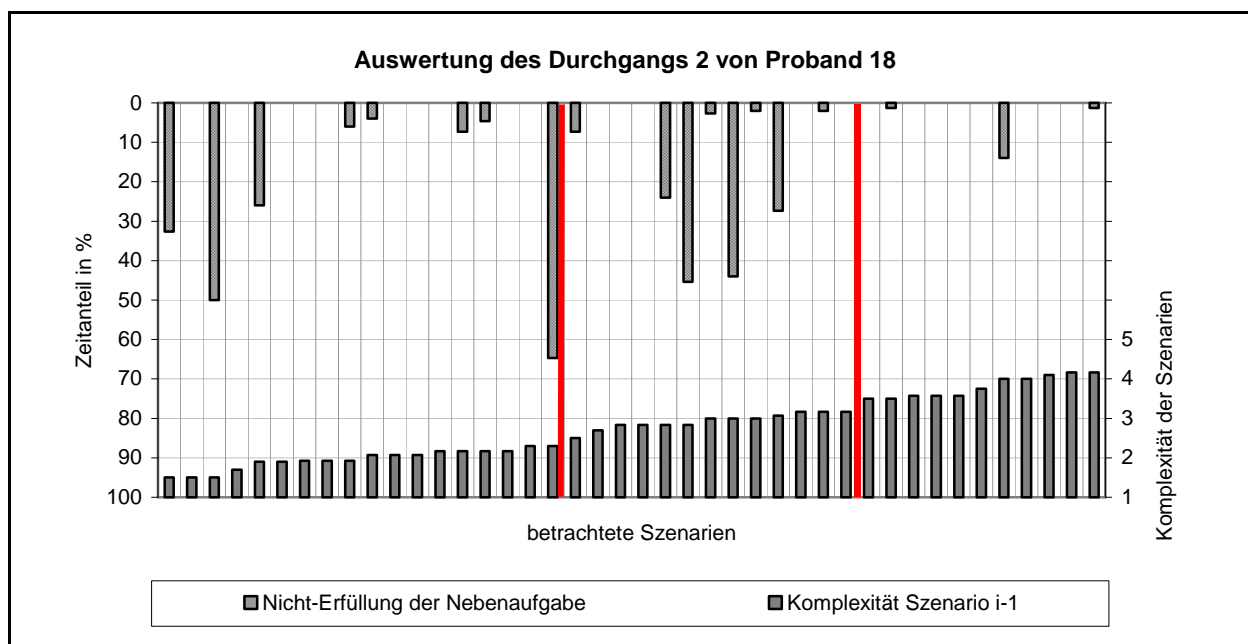


Bild A8.14: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 18, Durchgang 2

Anhang

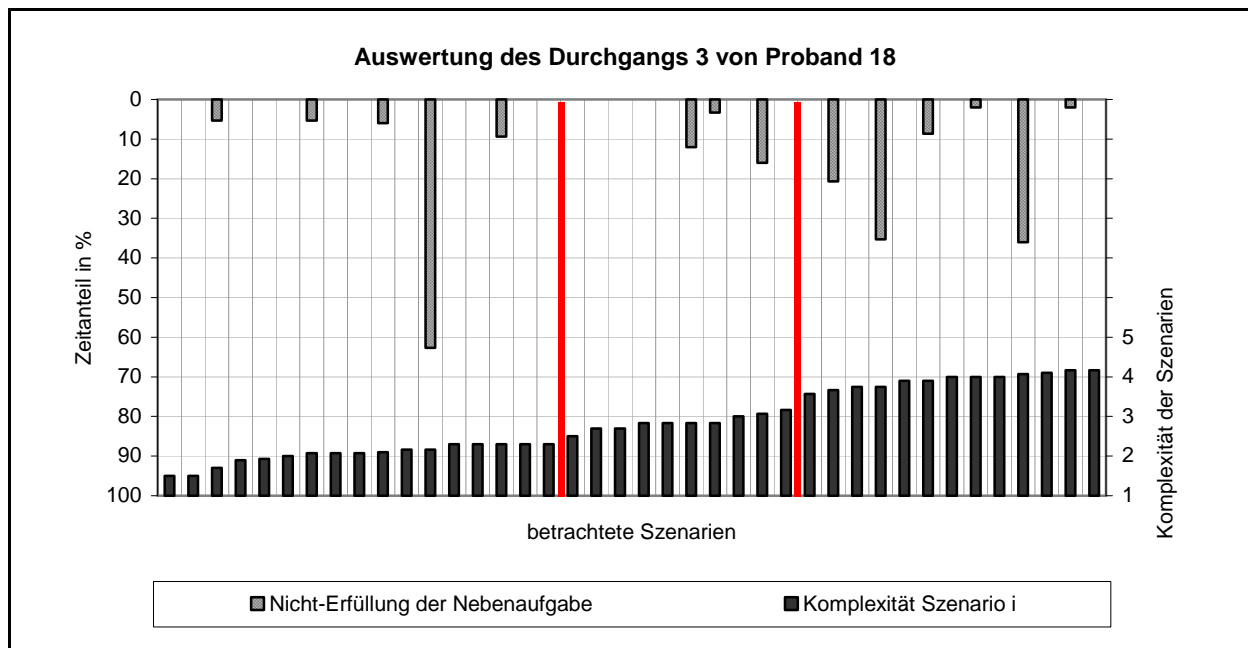


Bild A8.15: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 18, Durchgang 3

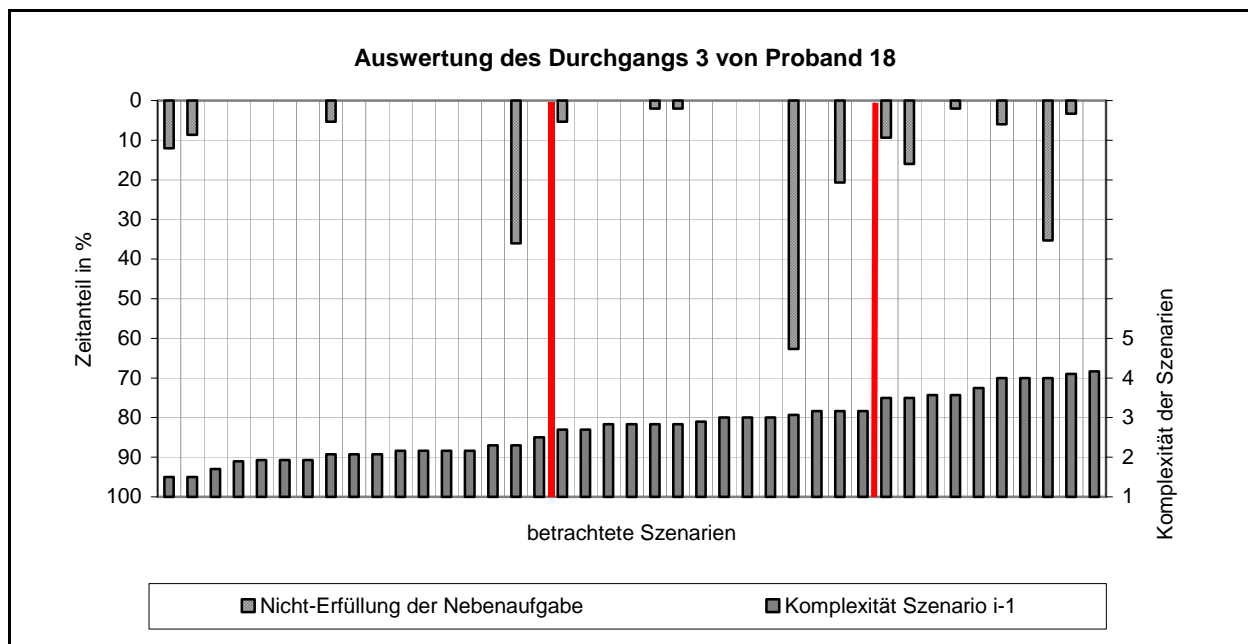


Bild A8.16: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 18, Durchgang 3

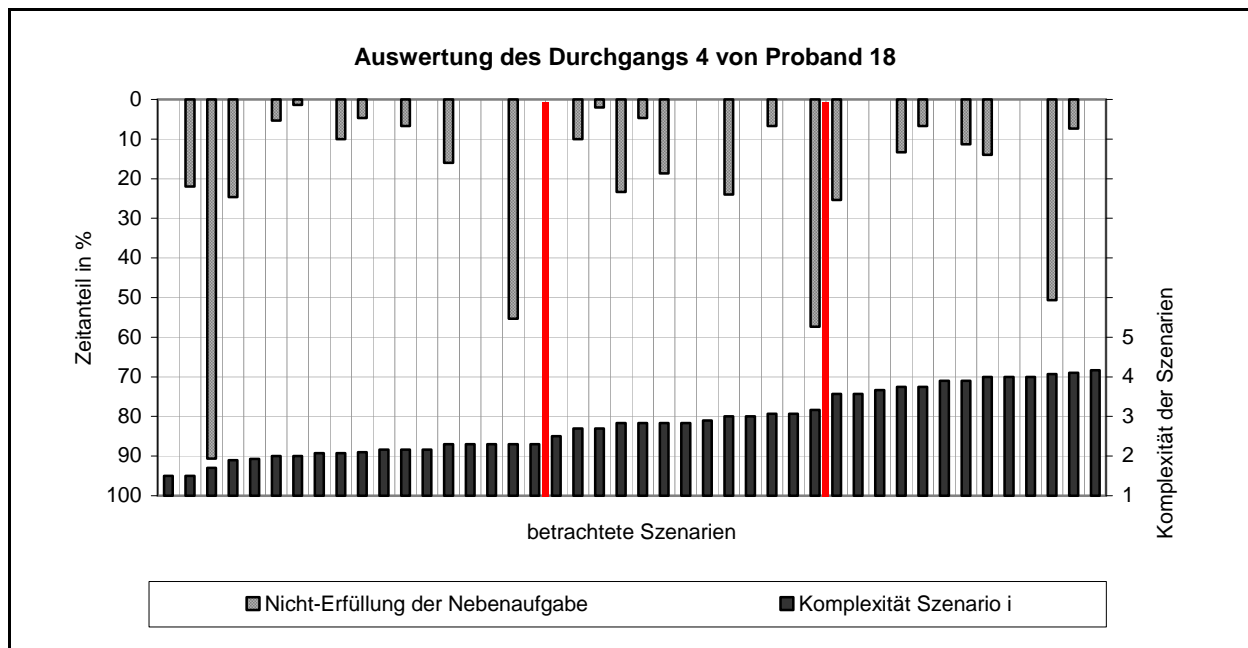


Bild A8.17: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 18, Durchgang 4

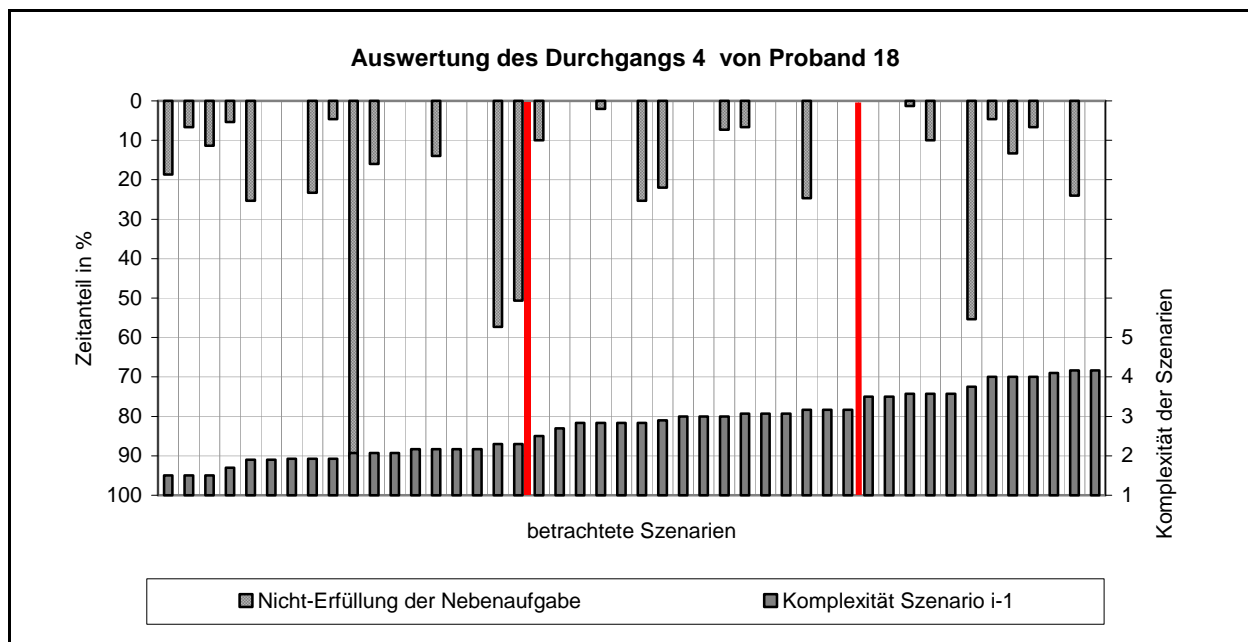


Bild A8.18: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 18, Durchgang 4

Anhang

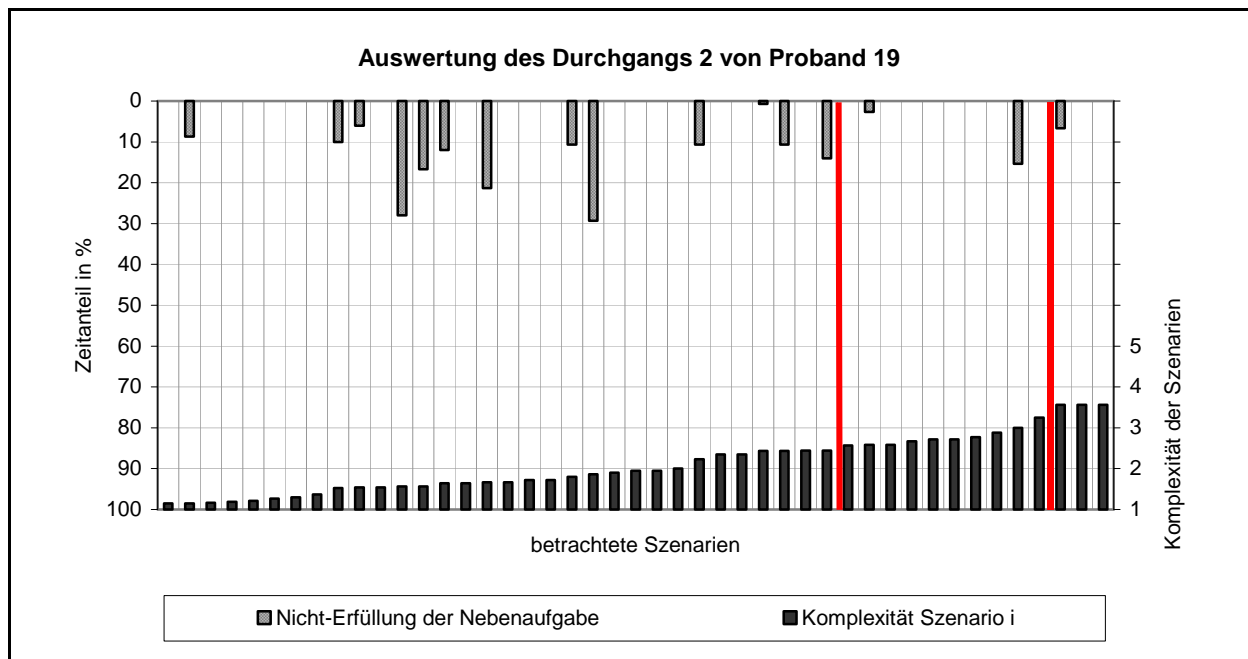


Bild A8.19: Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 19, Durchgang 2

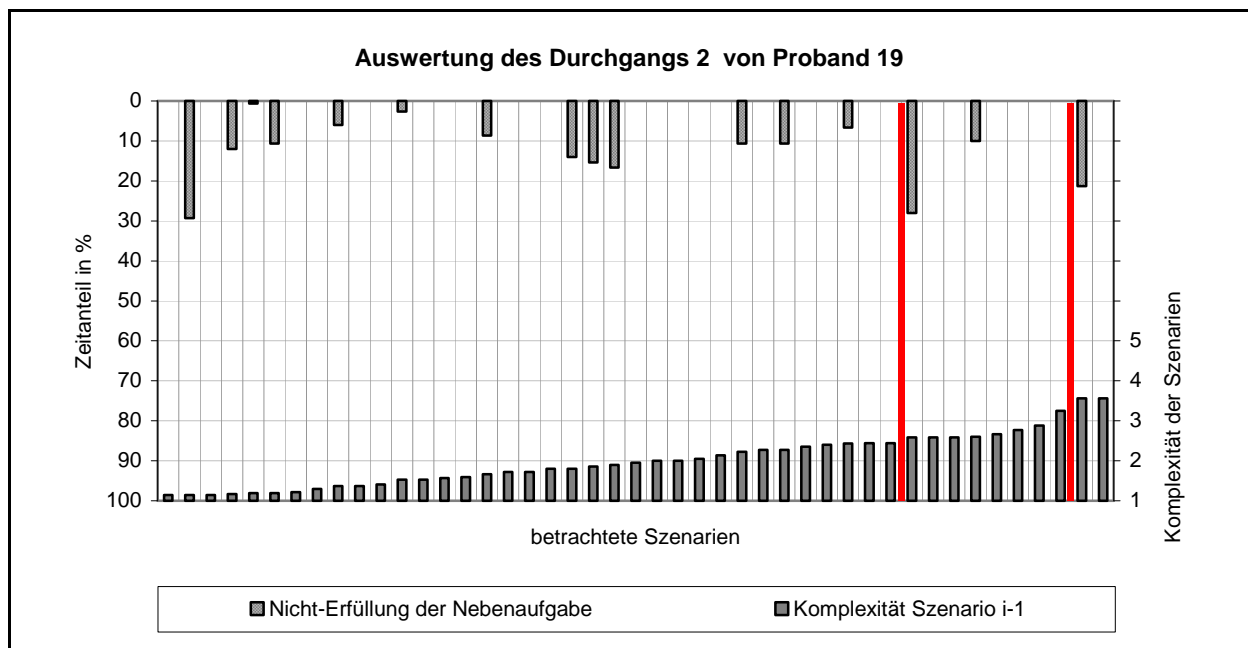


Bild A8.20: Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 19, Durchgang 2

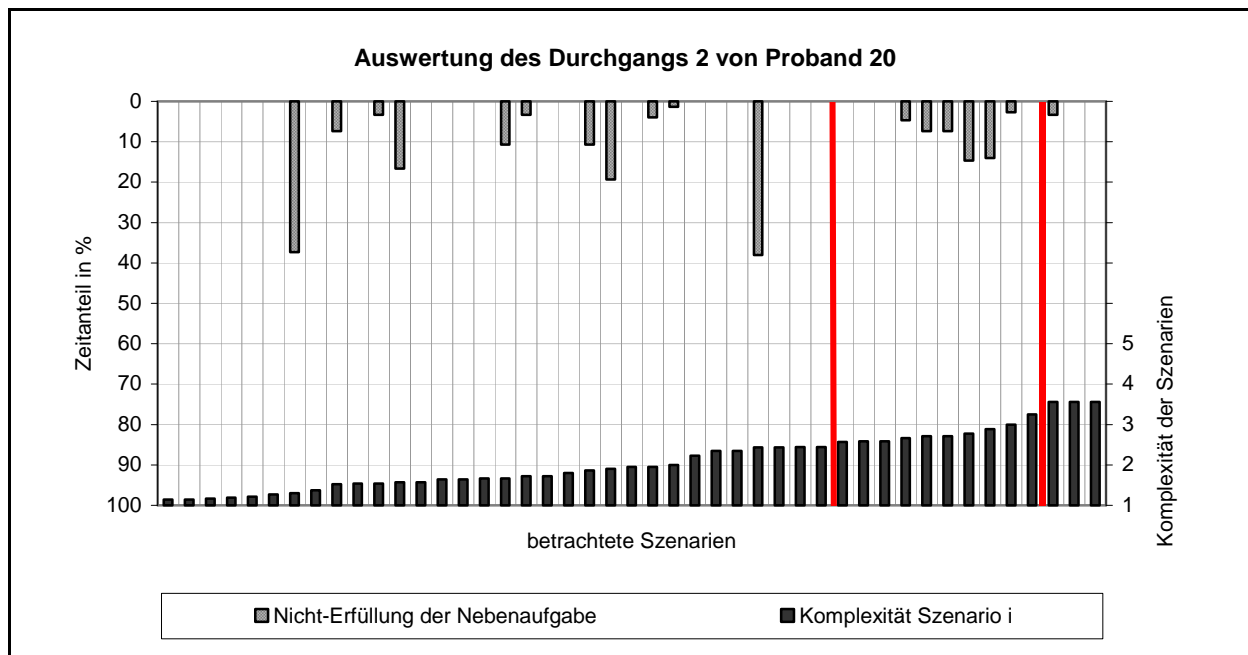


Bild A8.21: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 20, Durchgang 2

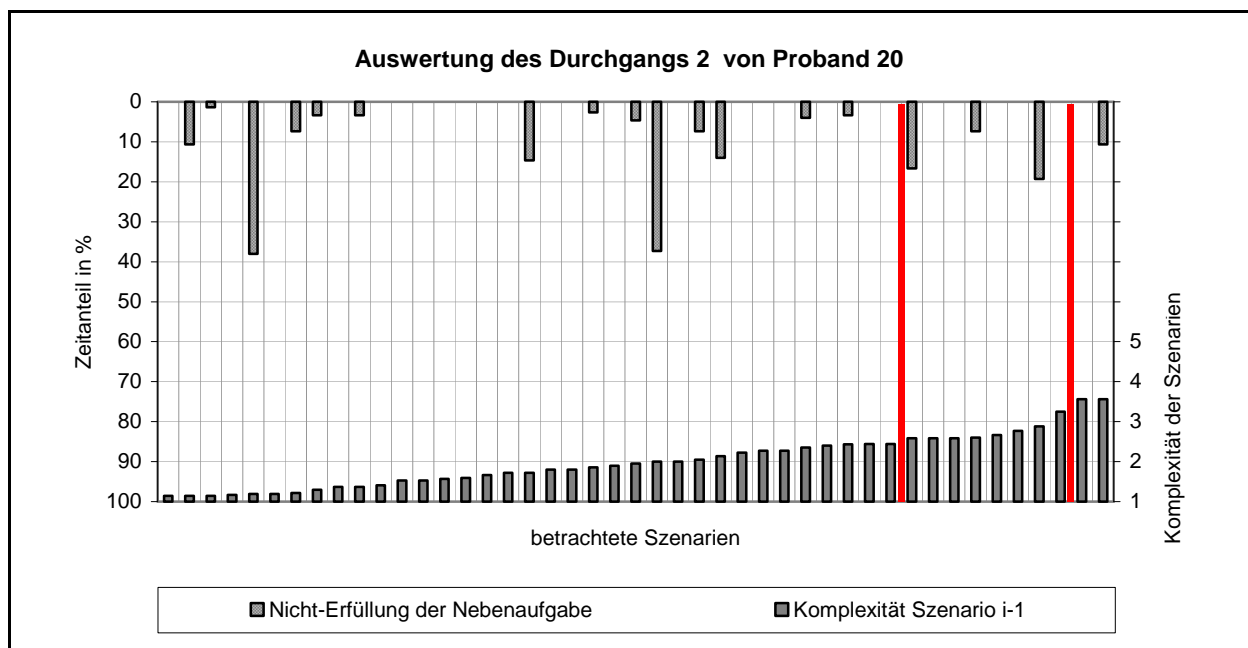


Bild A8.22: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 20, Durchgang 2

Anhang

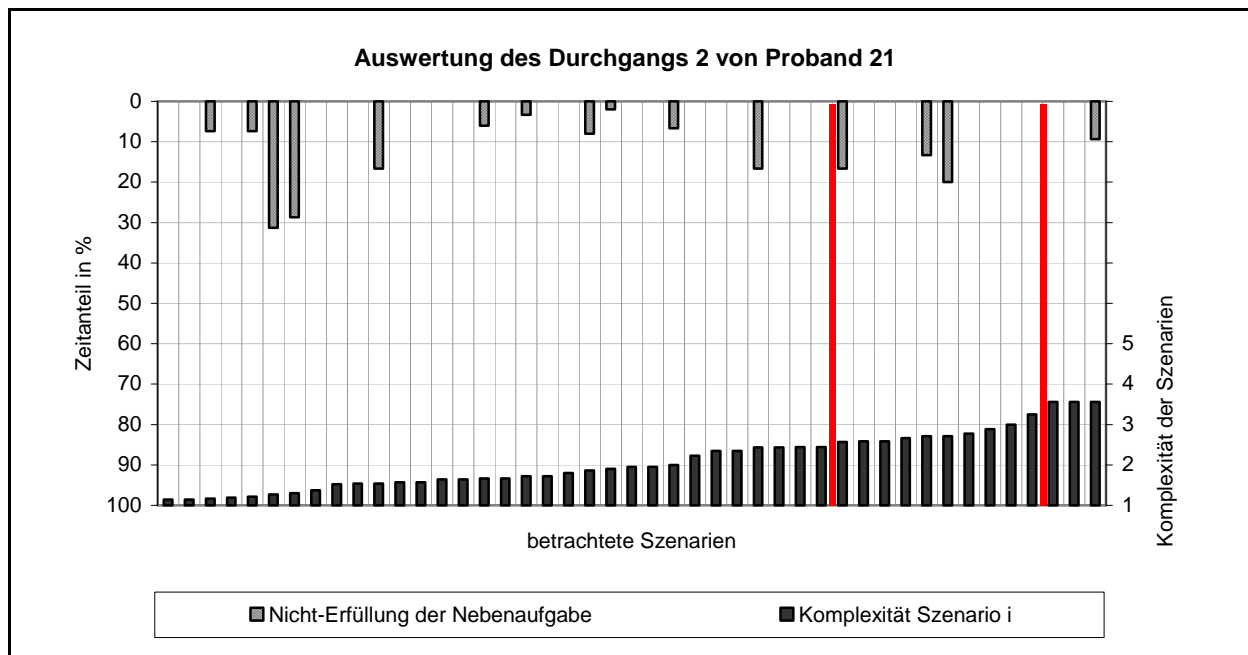


Bild A8.23: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 21, Durchgang 2

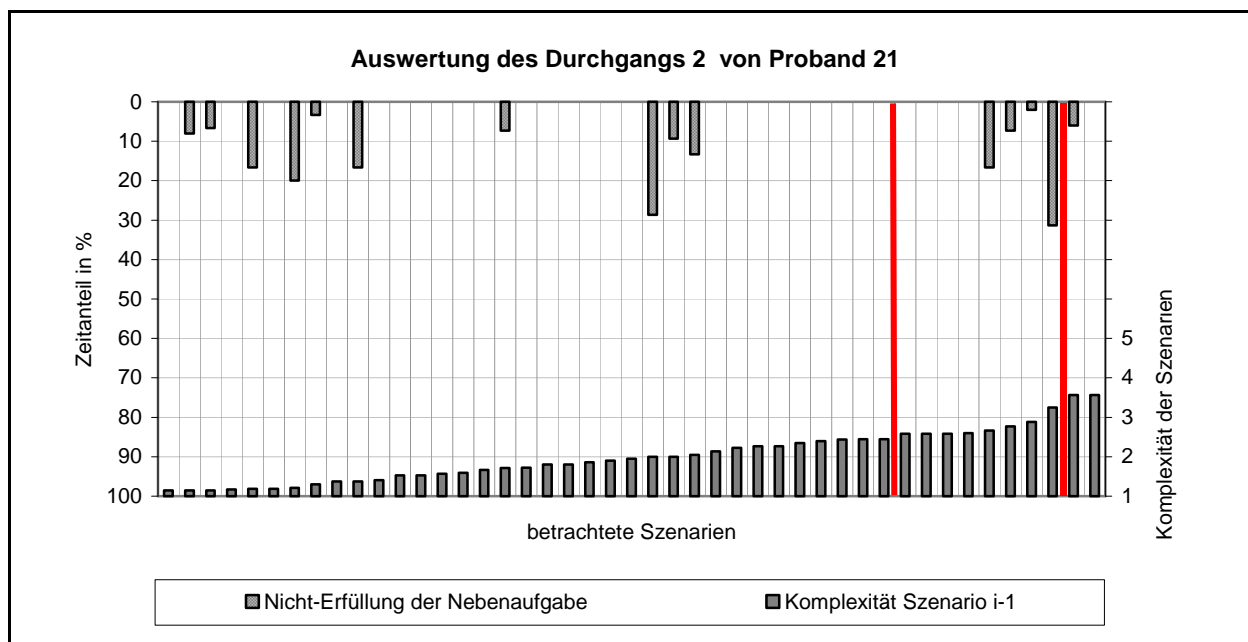


Bild A8.24: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 21, Durchgang 2

A8.2 Daten der Probanden der Altersgruppen alt und alt*

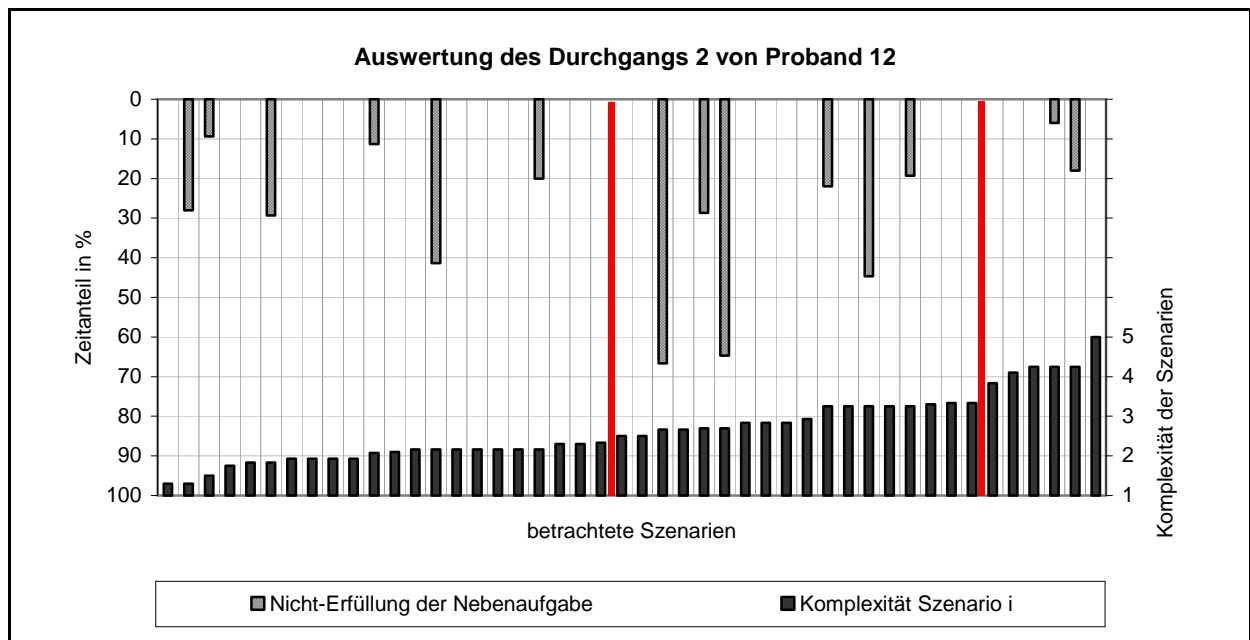


Bild A8.25: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 12, Durchgang 2

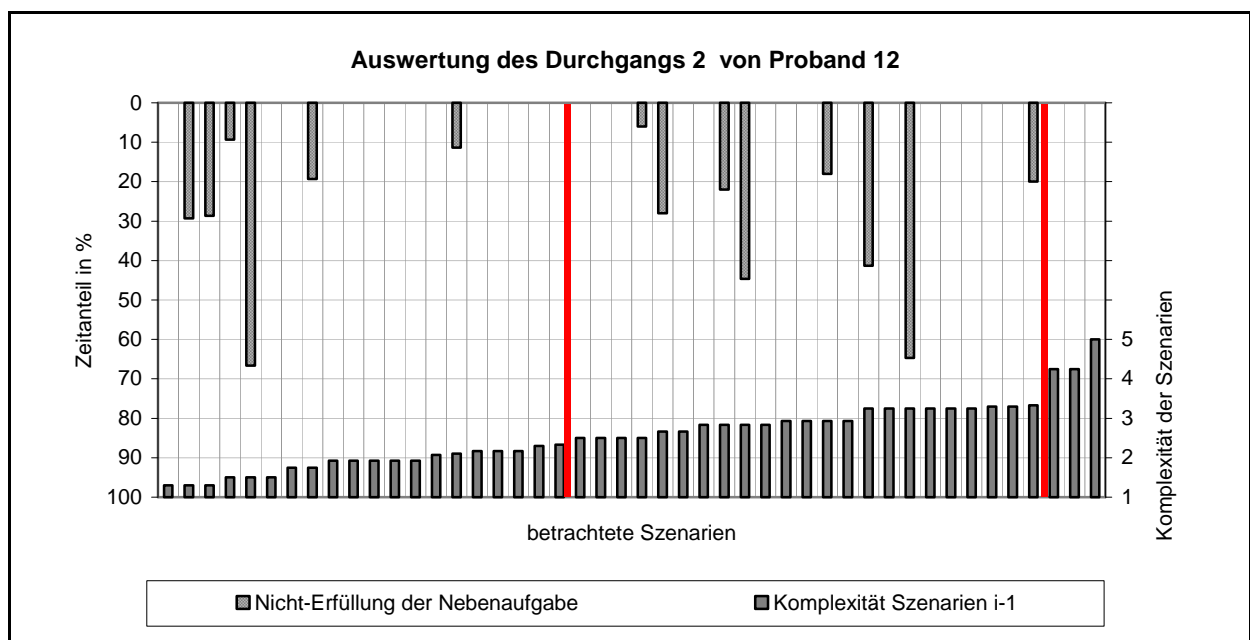


Bild A8.26: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 12, Durchgang 2

Anhang

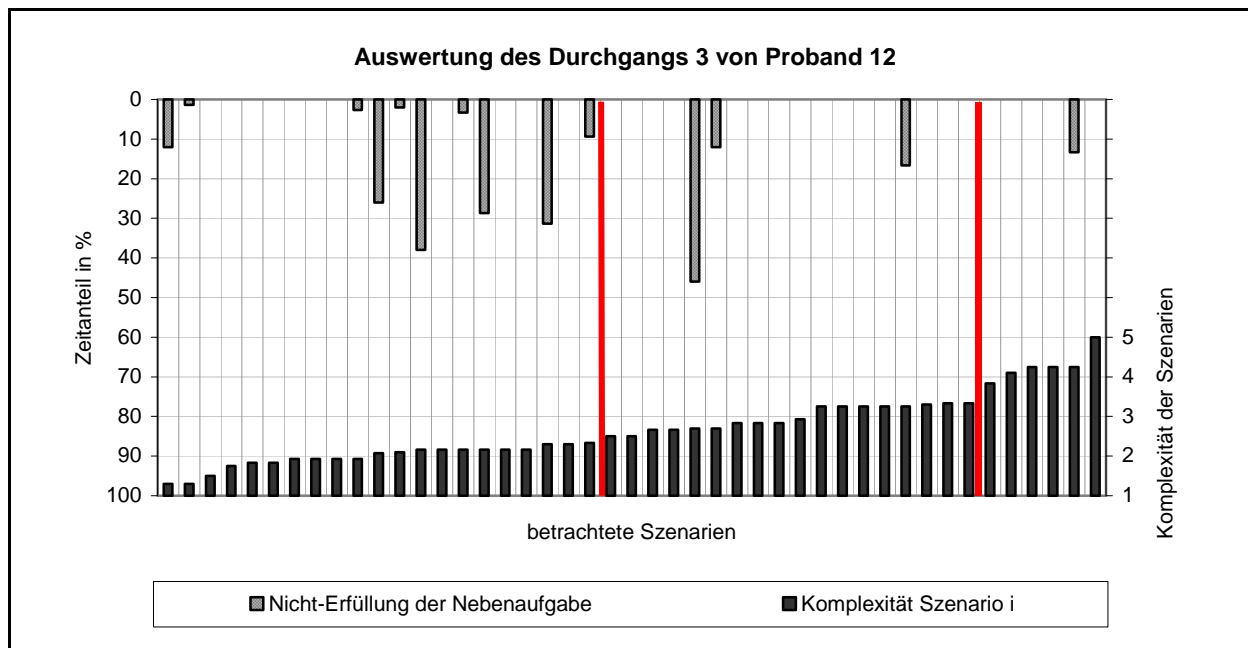


Bild A8.27: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 12, Durchgang 3

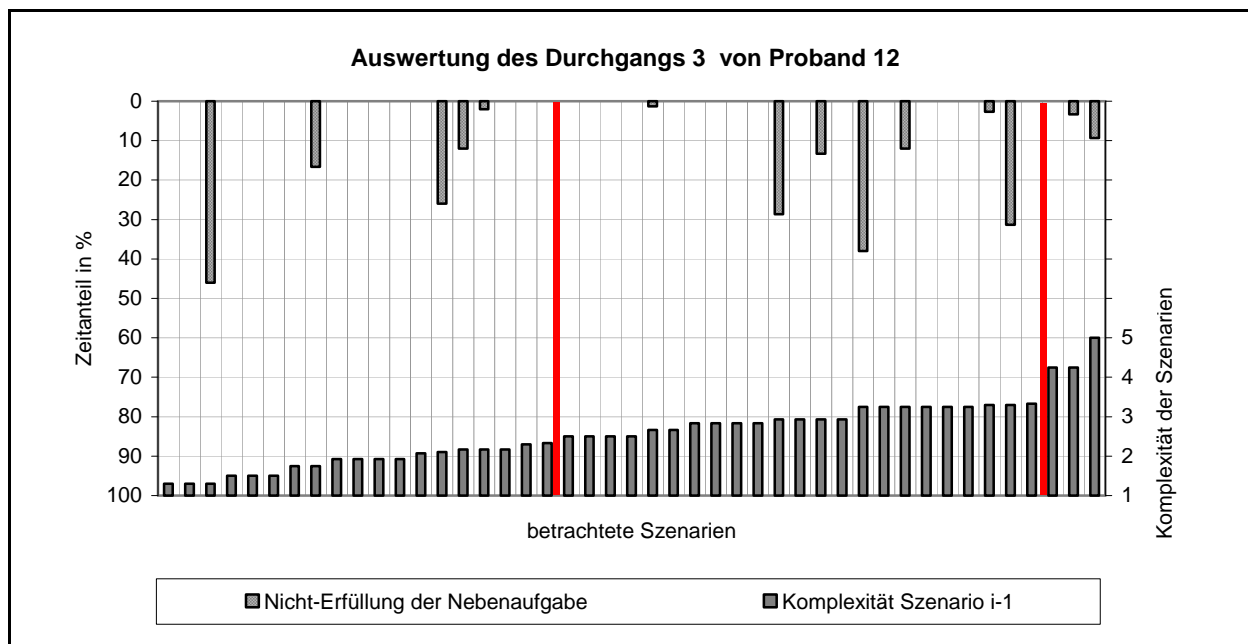


Bild A8.28: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 12, Durchgang 3

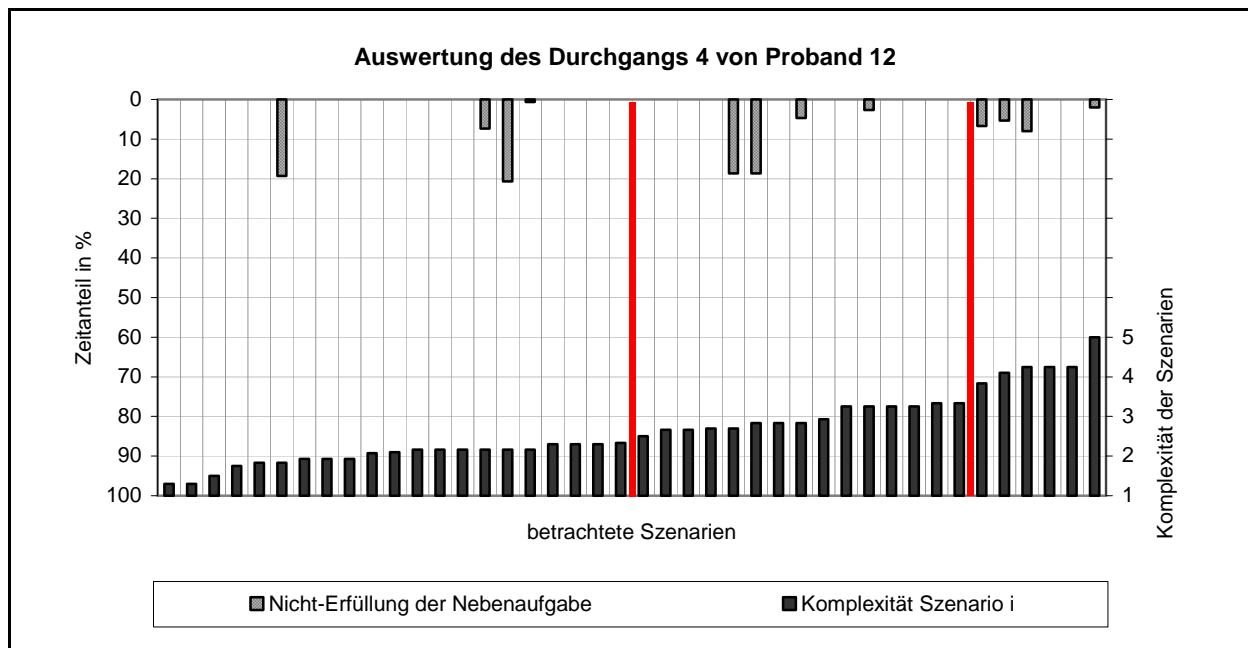


Bild A8.29: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 12, Durchgang 4

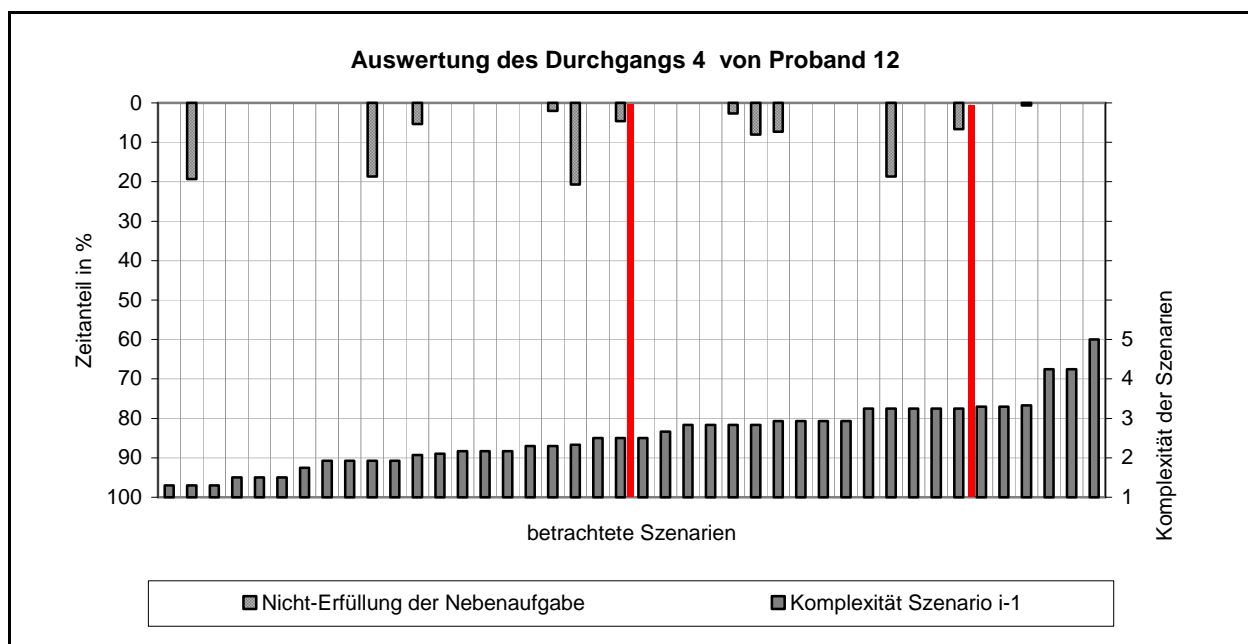


Bild A8.30: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 12, Durchgang 4

Anhang

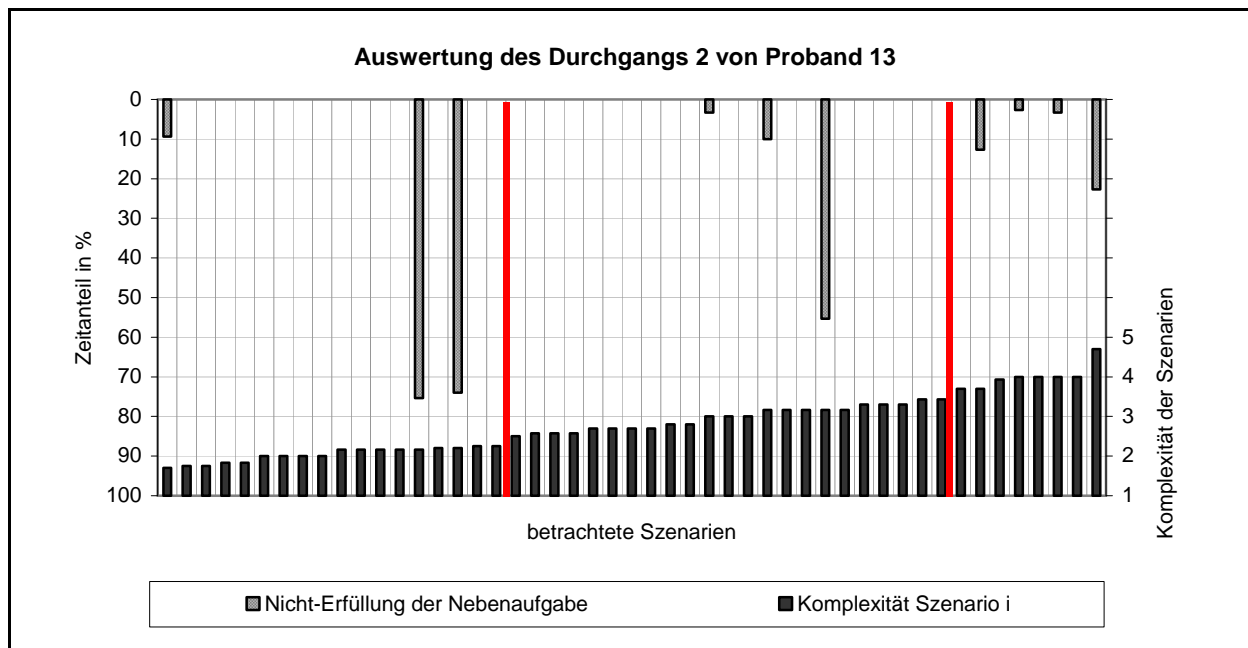


Bild A8.31: Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 13, Durchgang 2

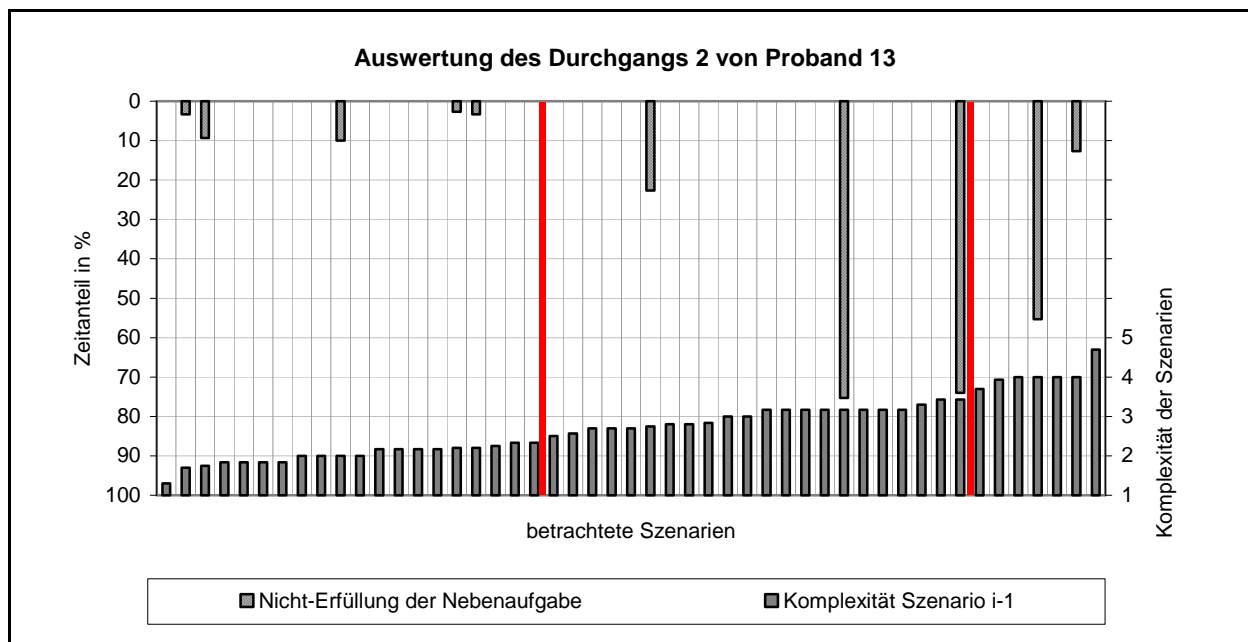


Bild A8.32: Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 13, Durchgang 2

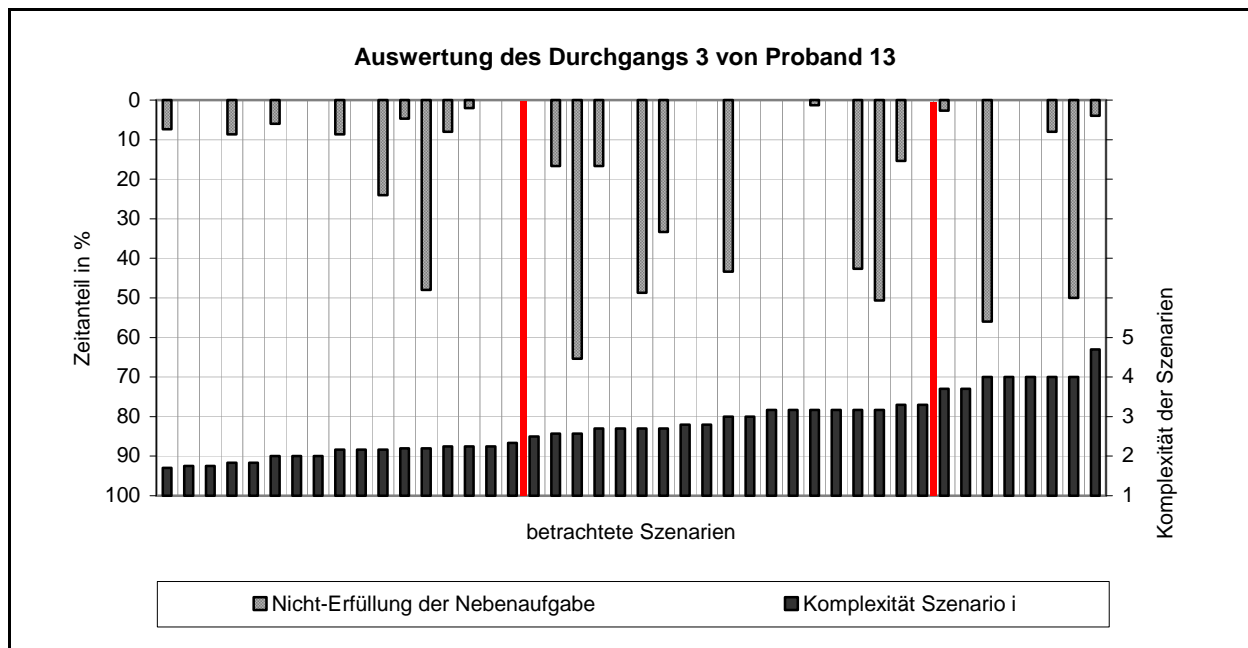


Bild A8.33: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 13, Durchgang 3

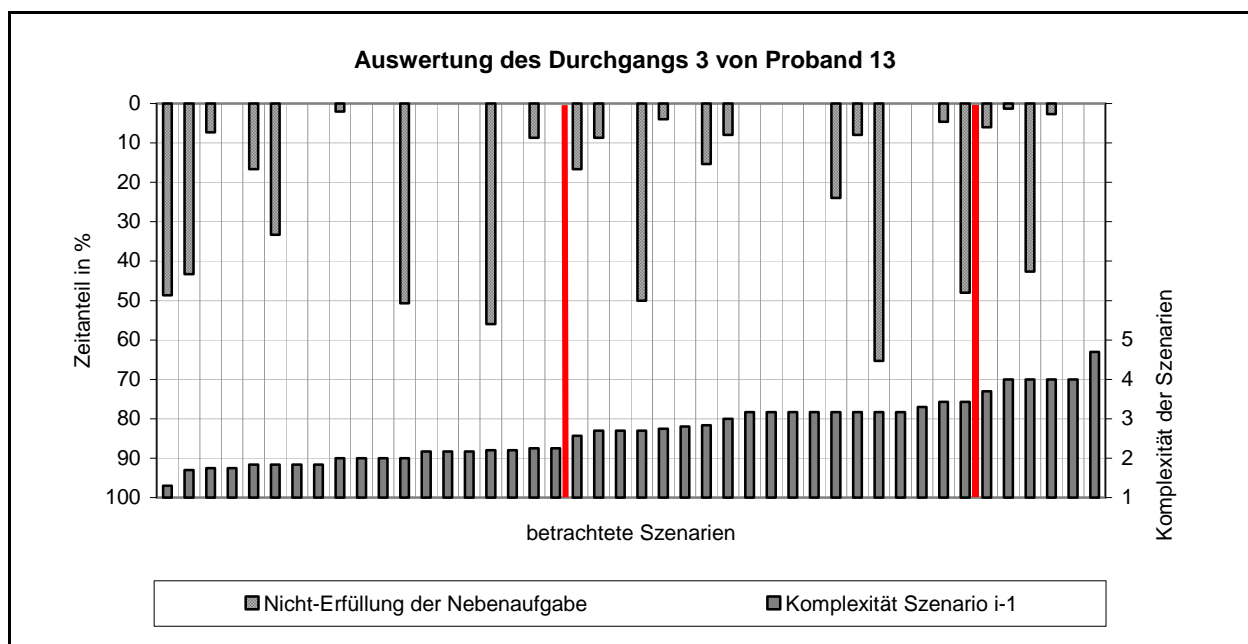


Bild A8.34: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 13, Durchgang 3

Anhang

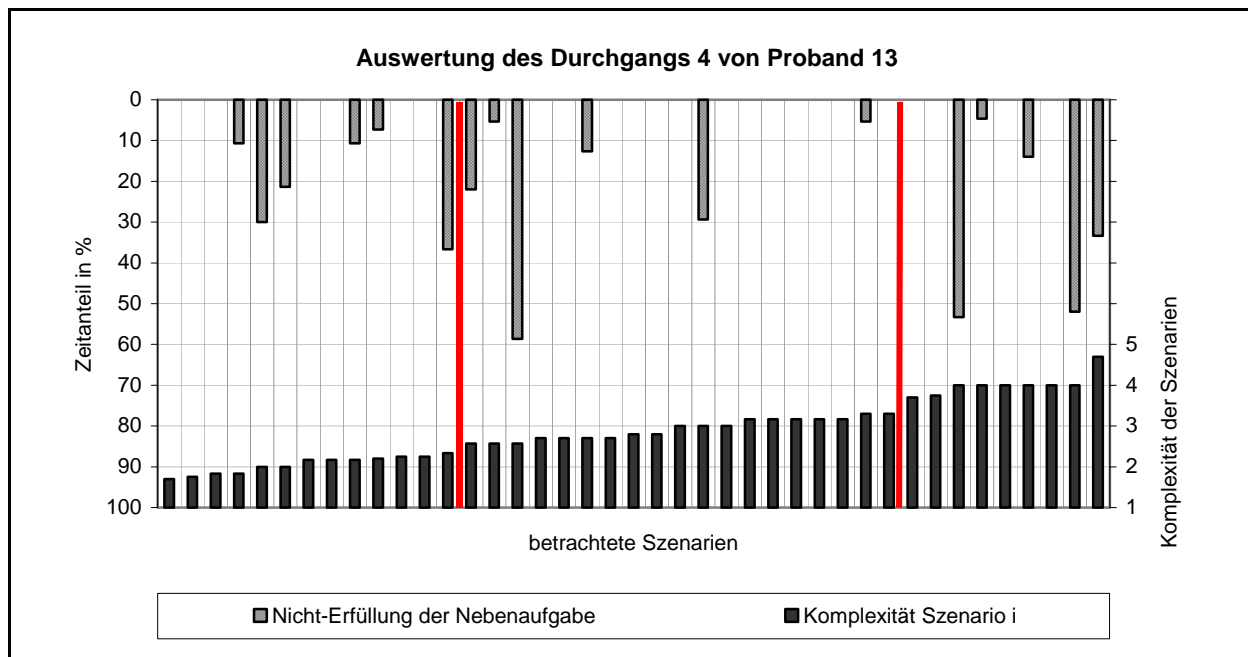


Bild A8.35: Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 13, Durchgang 4

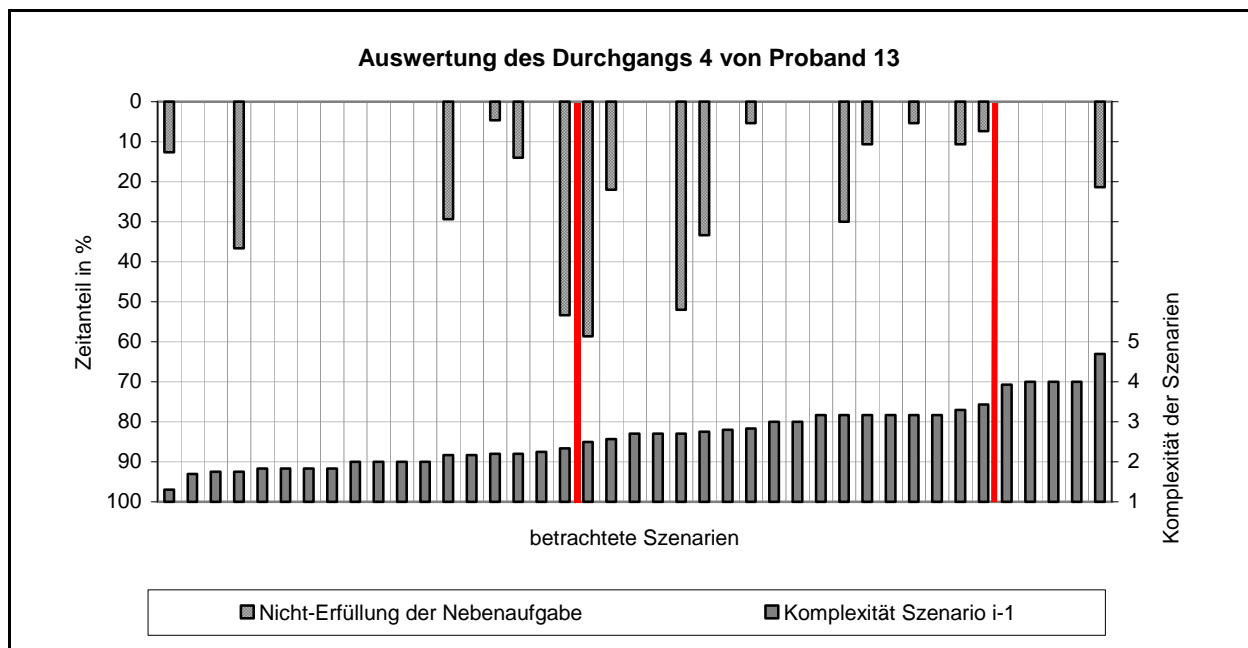


Bild A8.36: Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 13, Durchgang 4

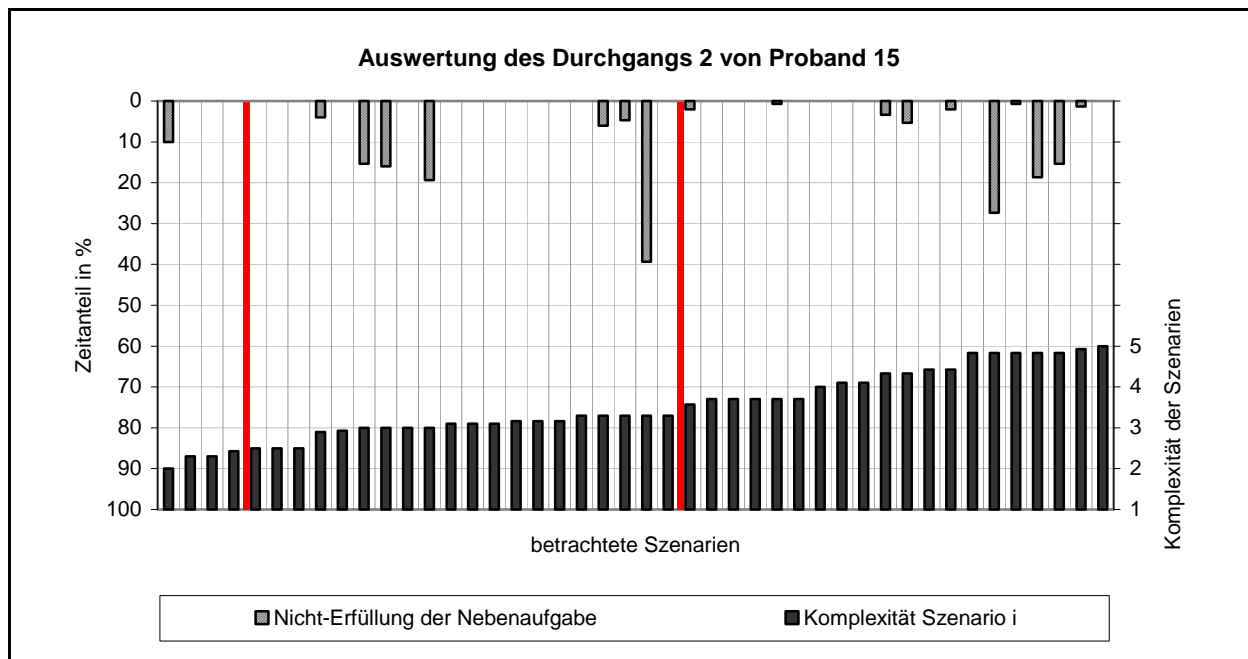


Bild A8.37: Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 15, Durchgang 2

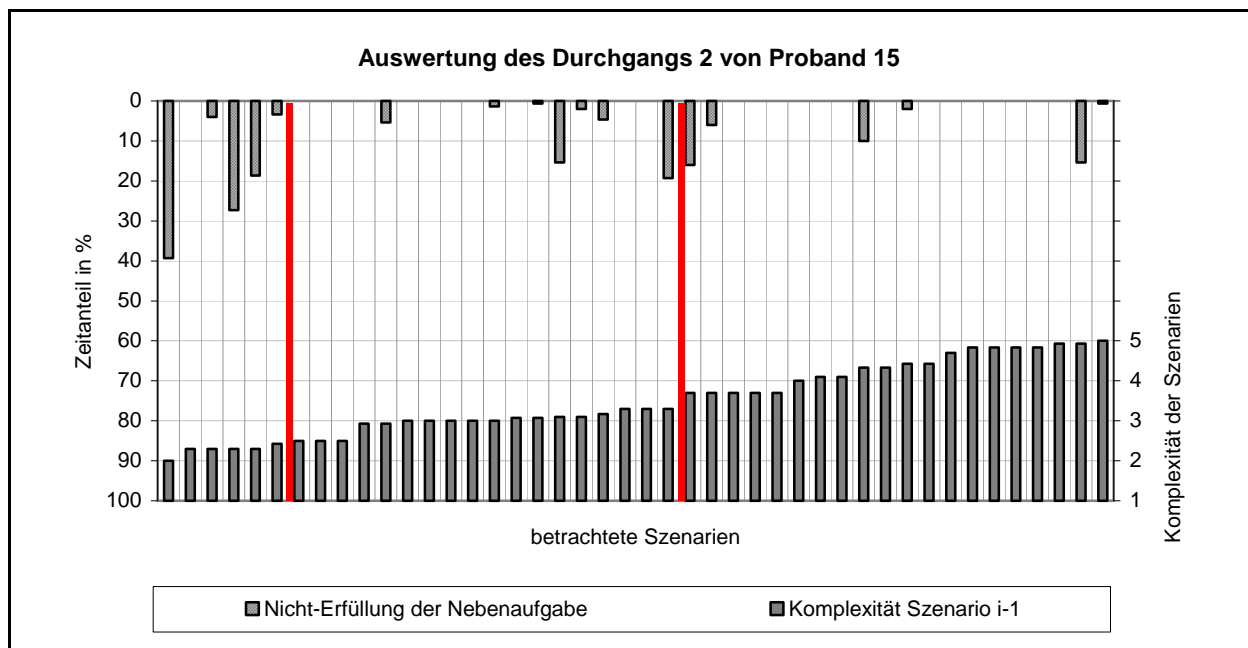


Bild A8.38: Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 15, Durchgang 2

Anhang

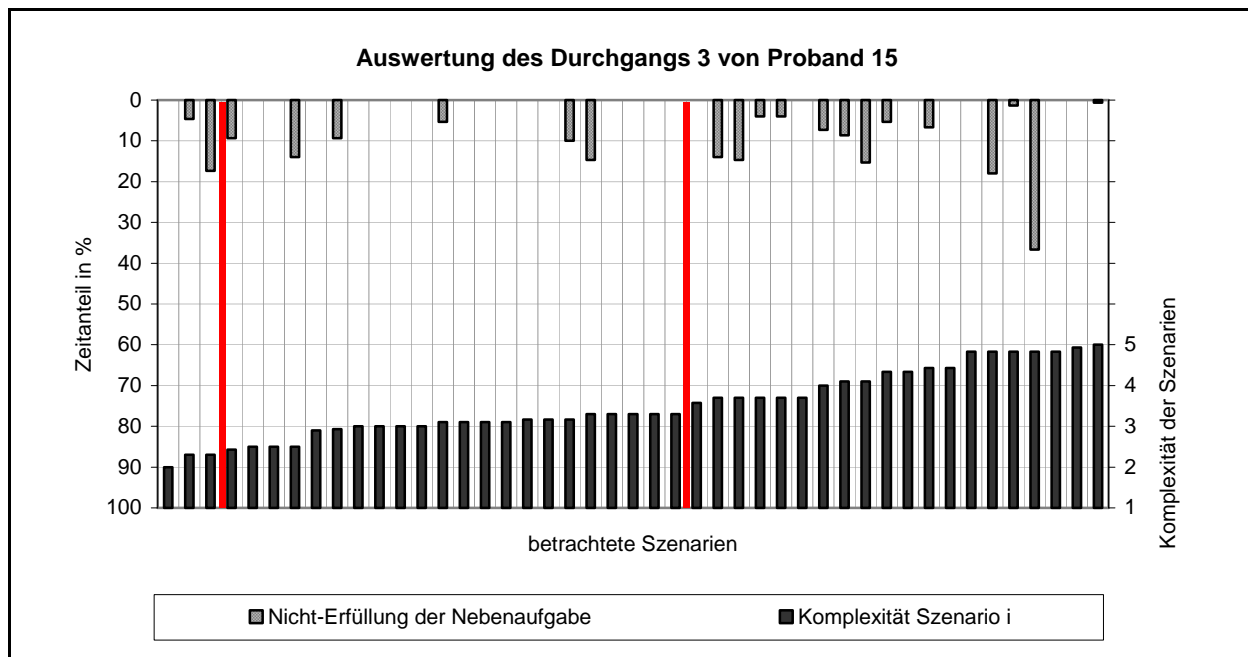


Bild A8.39: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 15, Durchgang 3

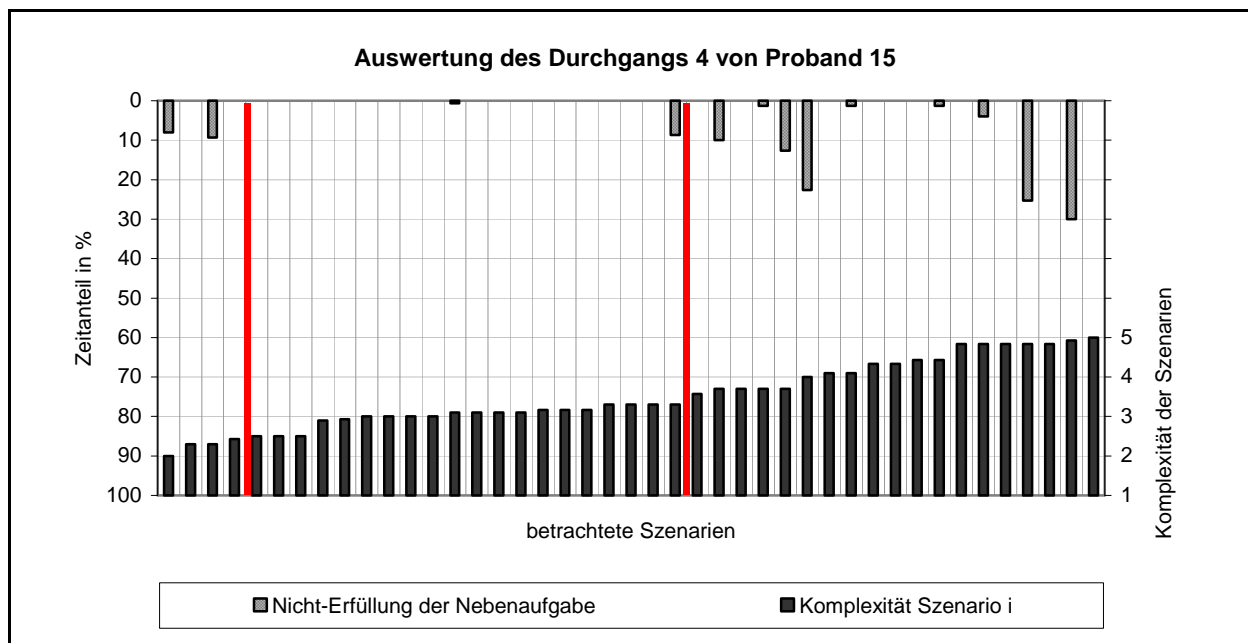


Bild A8.40: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 15, Durchgang 3

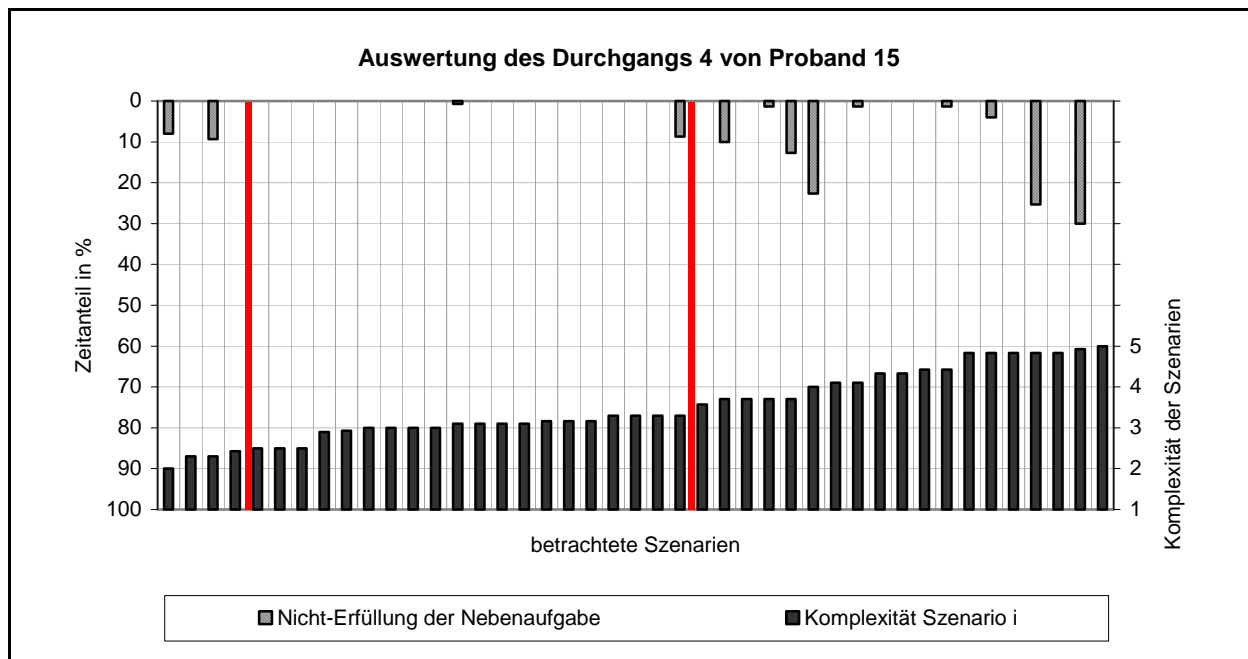


Bild A8.41: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 15, Durchgang 4

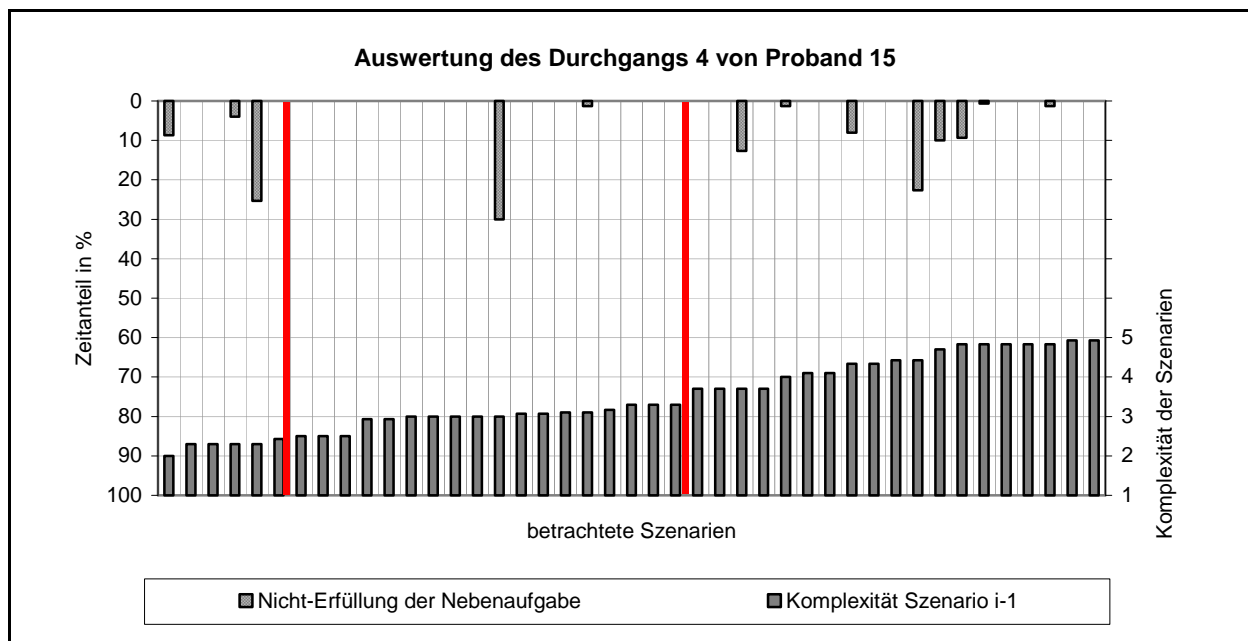


Bild A8.42: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 15, Durchgang 4

Anhang

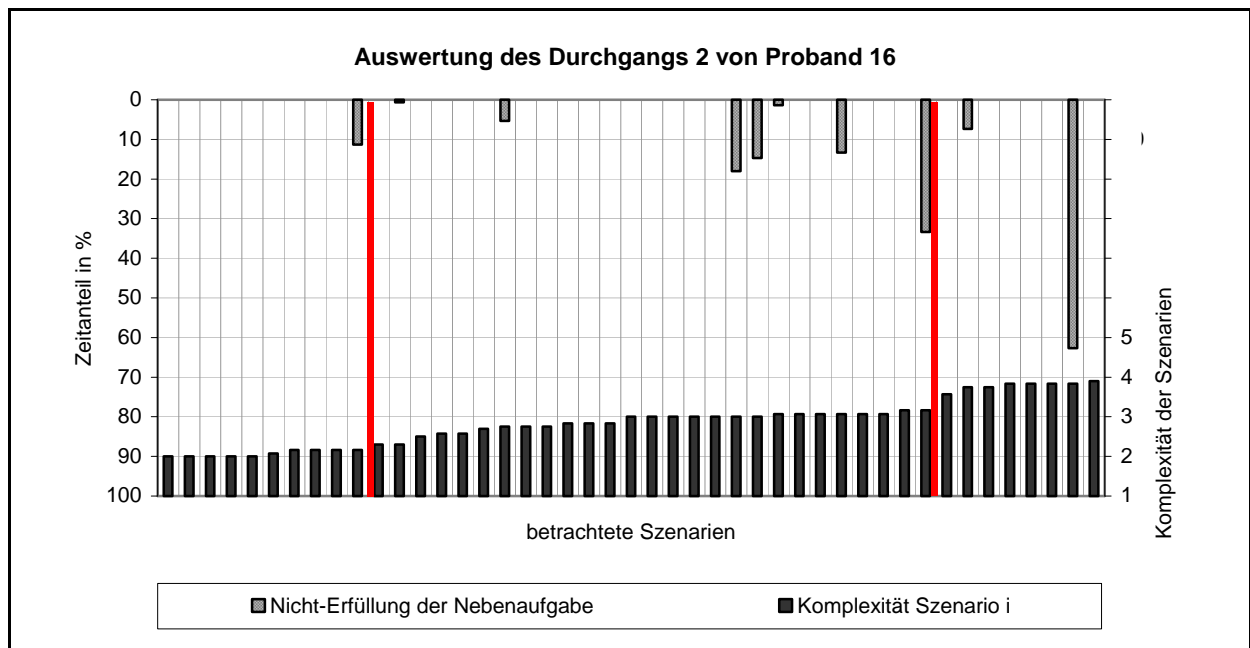


Bild A8.43: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 16, Durchgang 2

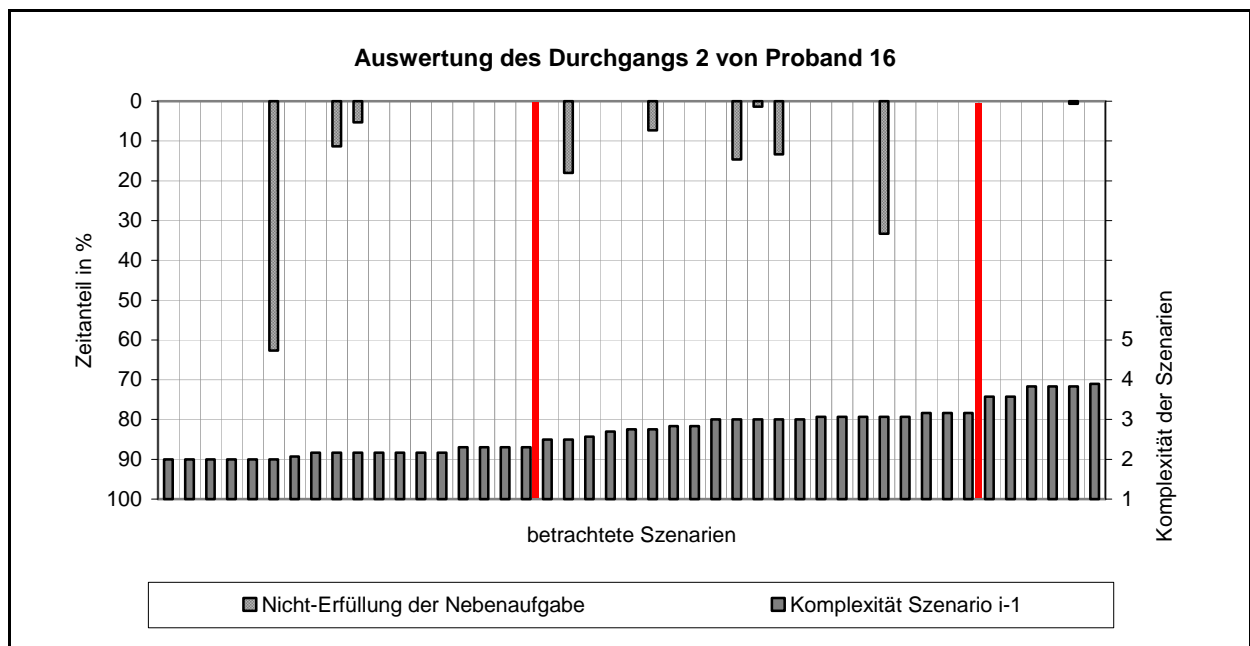


Bild A8.44: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 16, Durchgang 2

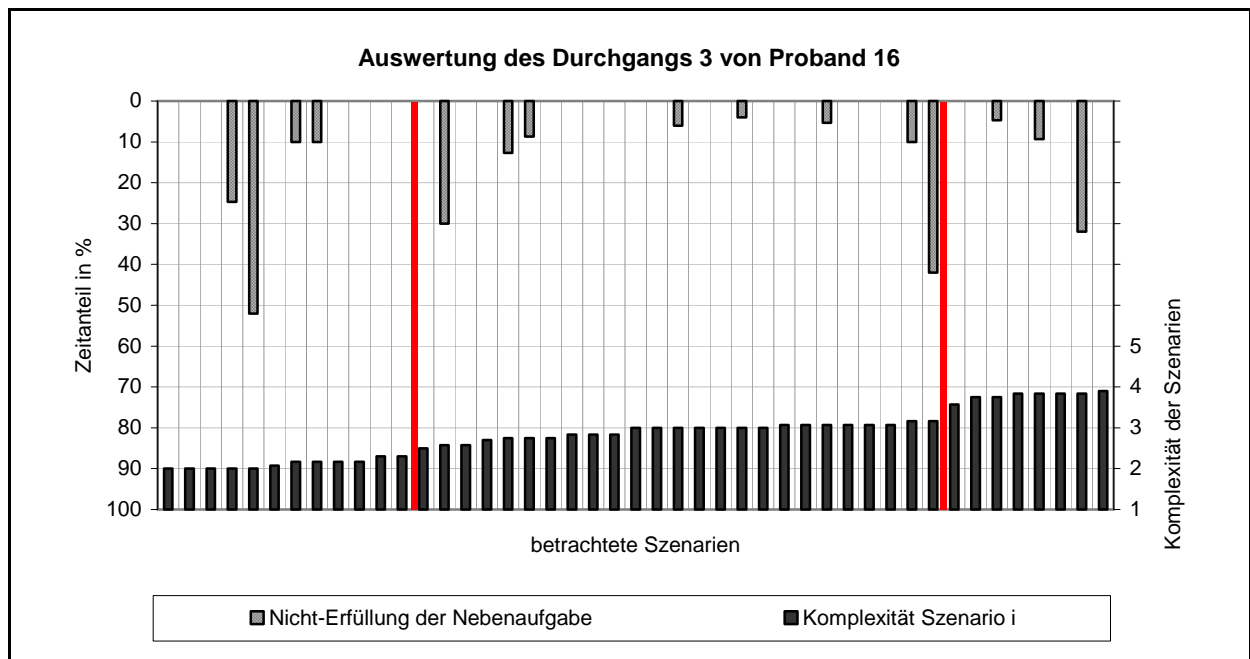


Bild A8.45: Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 16, Durchgang 3

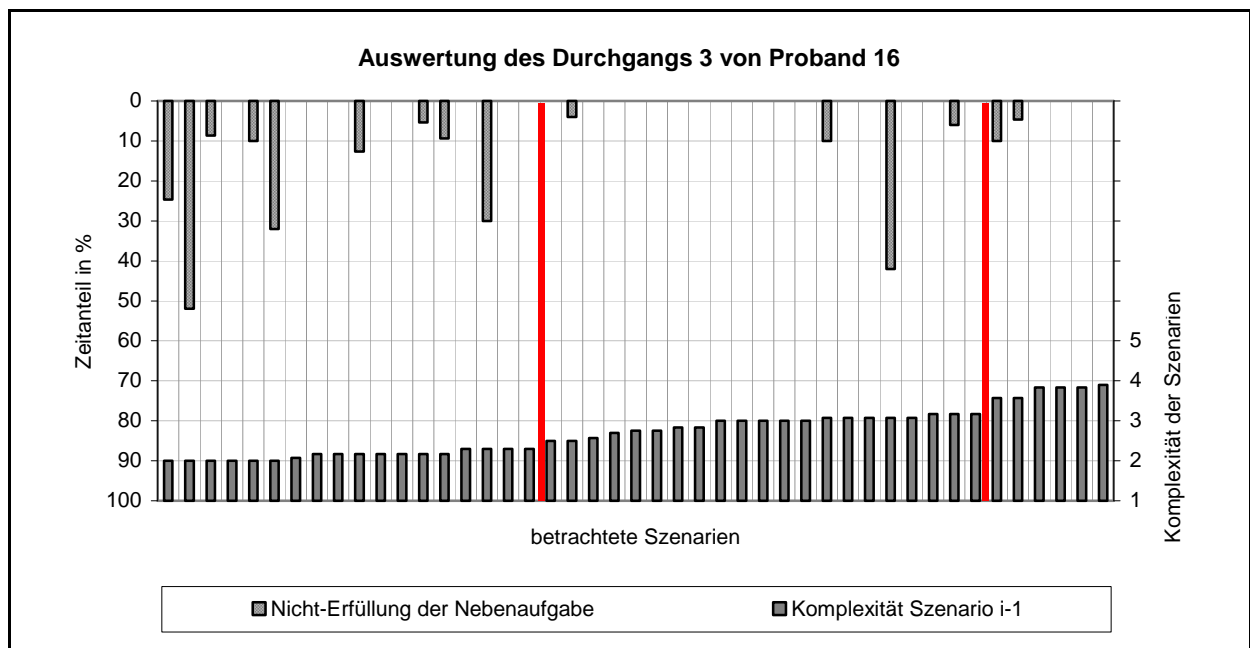


Bild A8.46: Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 16, Durchgang 3

Anhang

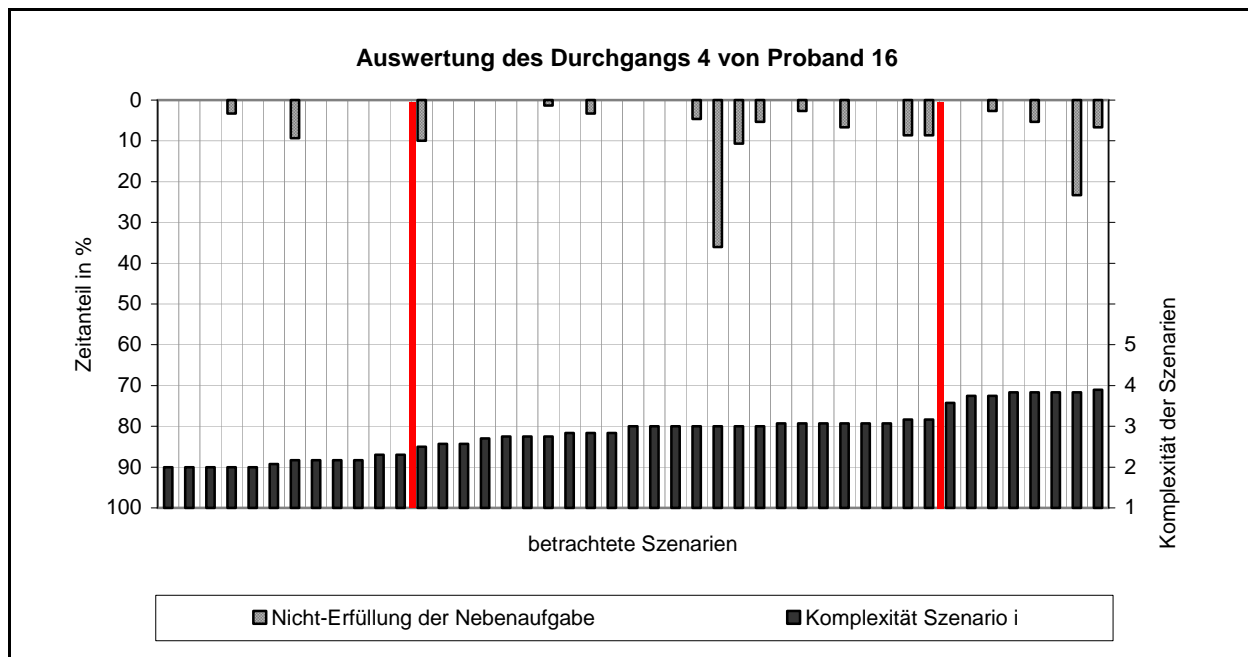


Bild A8.47: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 16, Durchgang 4

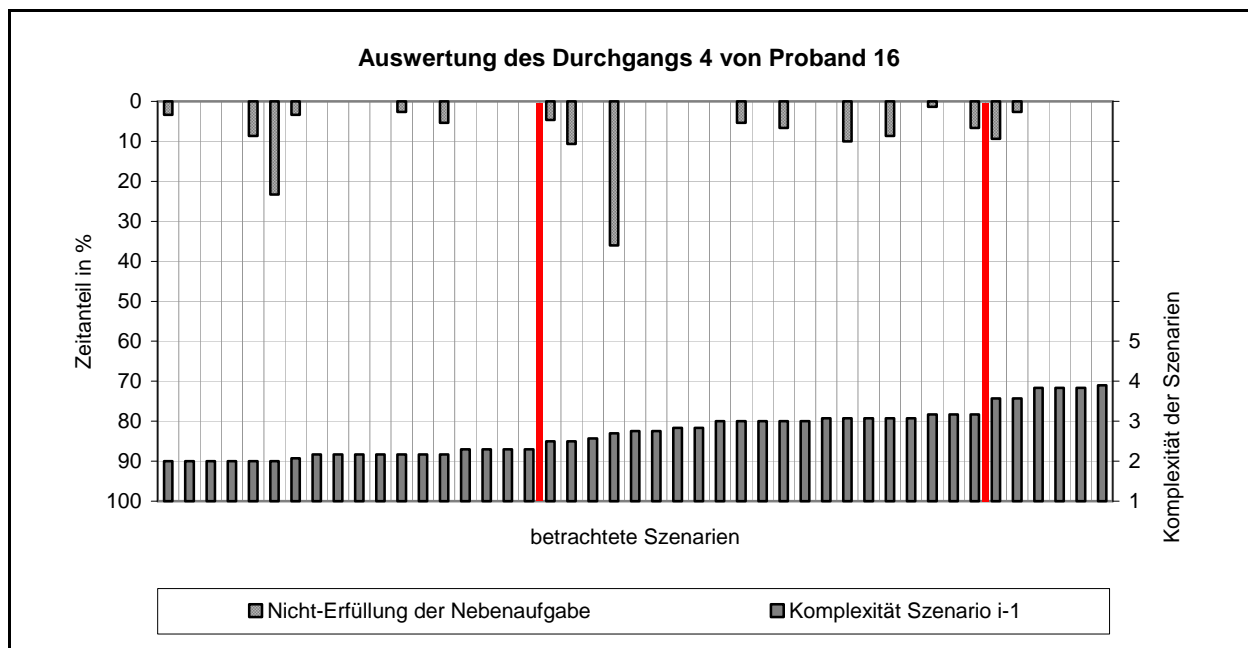


Bild A8.48: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 16, Durchgang 4

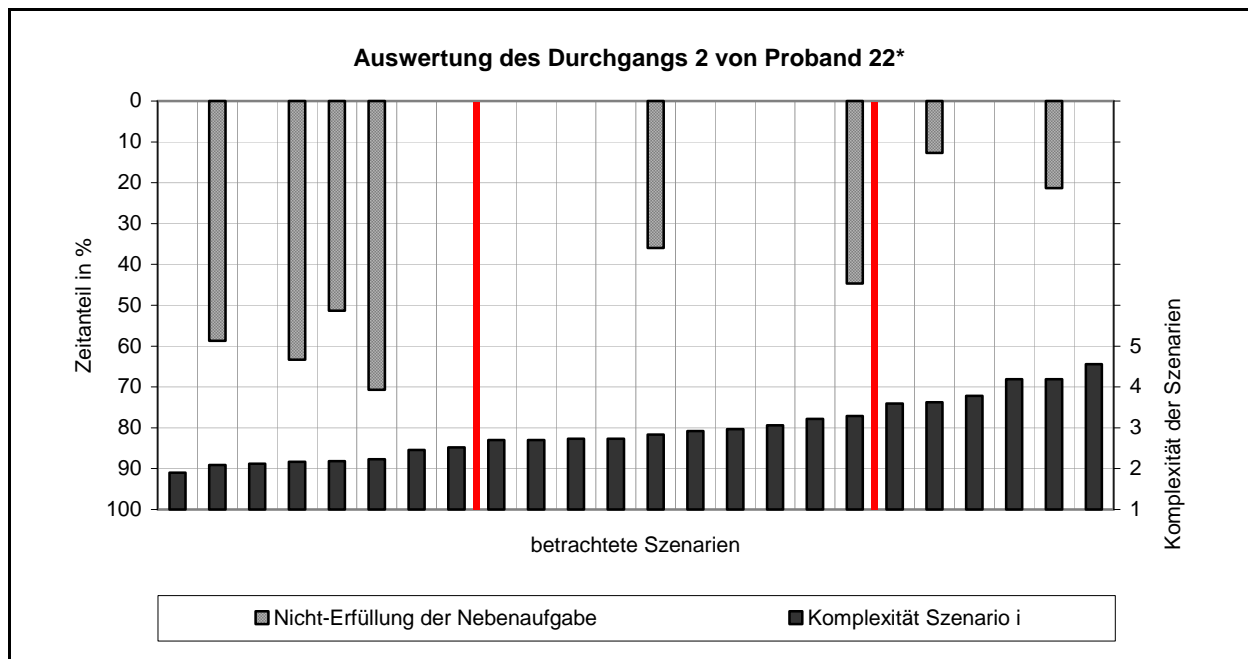


Bild A8.49: Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 22*, Durchgang 2

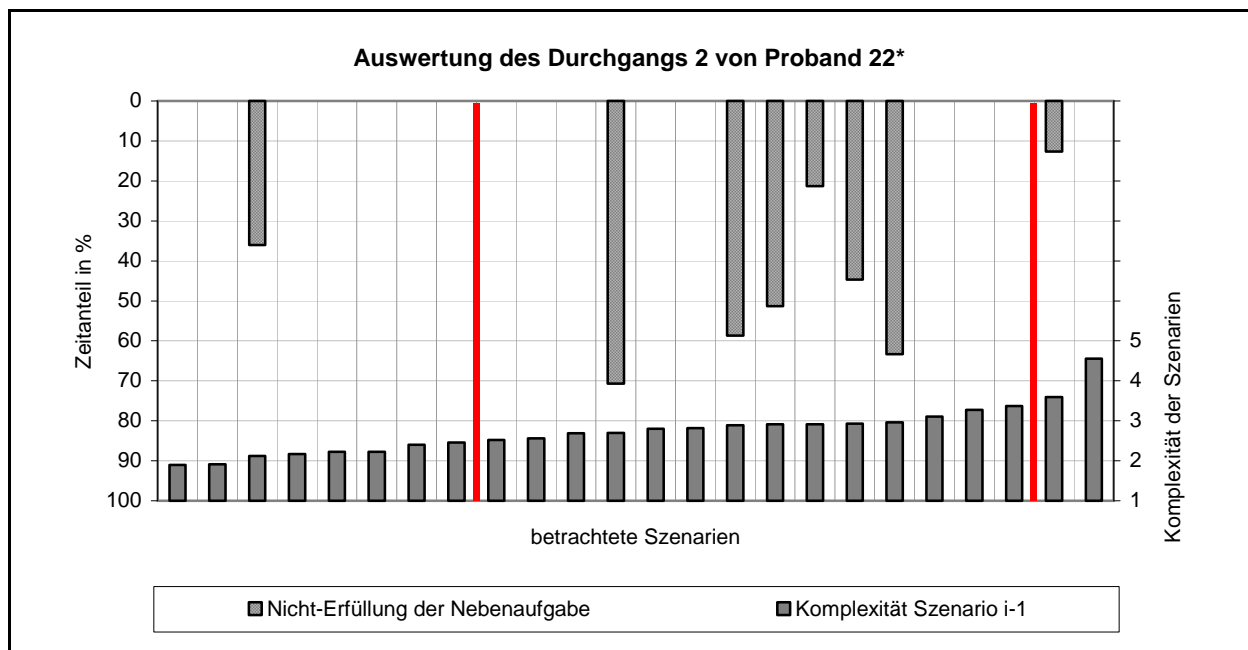


Bild A8.50: Nicht-Erfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 22*, Durchgang 2

Anhang

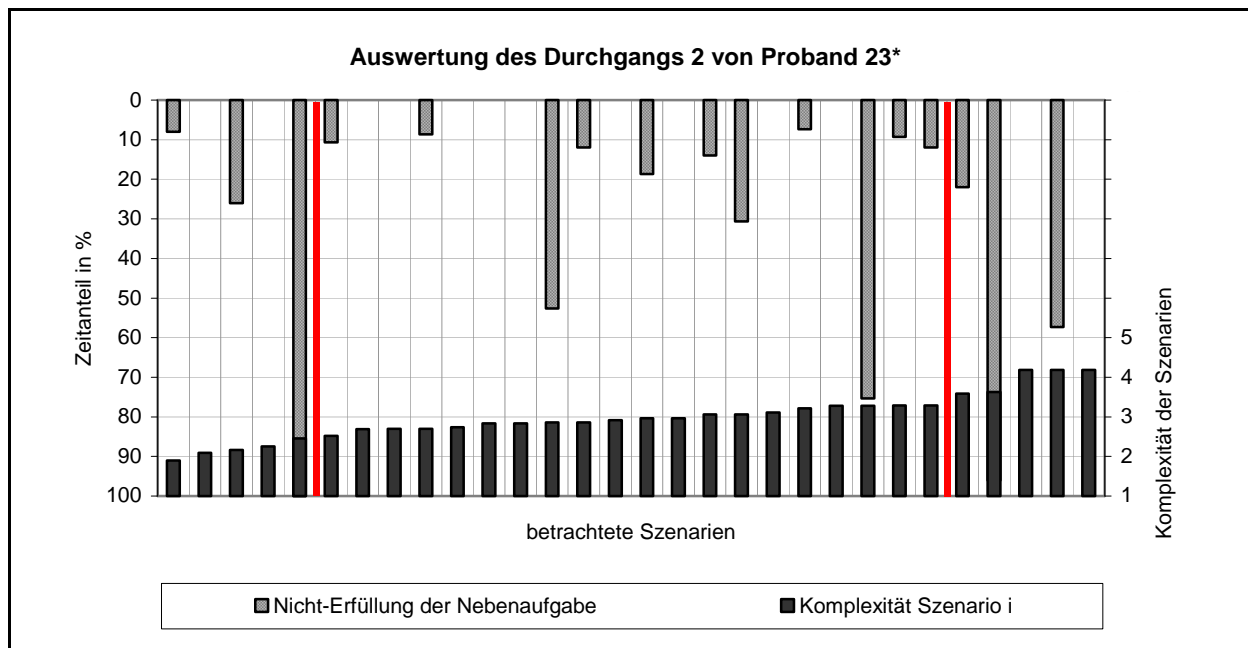


Bild A8.51: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i, Proband 23*, Durchgang 2

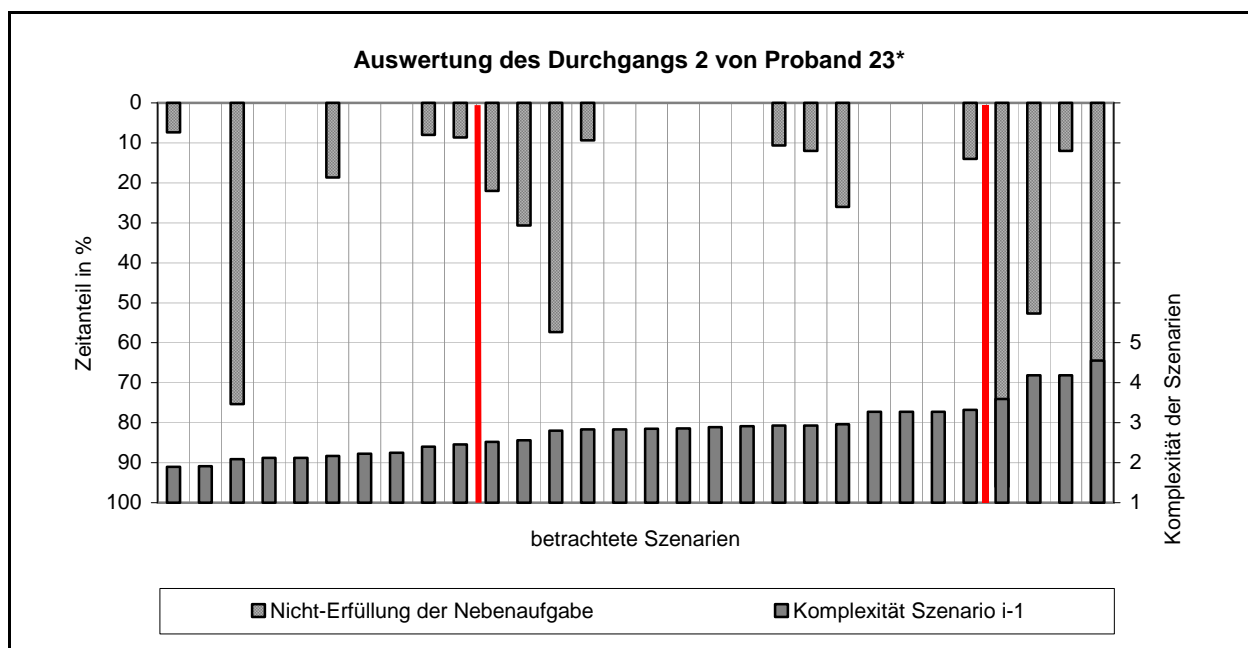


Bild A8.52: Nichterfüllung der Nebenaufgabe vs. Komplexität Szenario i-1, Proband 23*, Durchgang 2

A9 Daten für die statistischen Auswertungen der Komplexitätsmodelle

A9.1 Daten der Altersgruppen jung und mittel

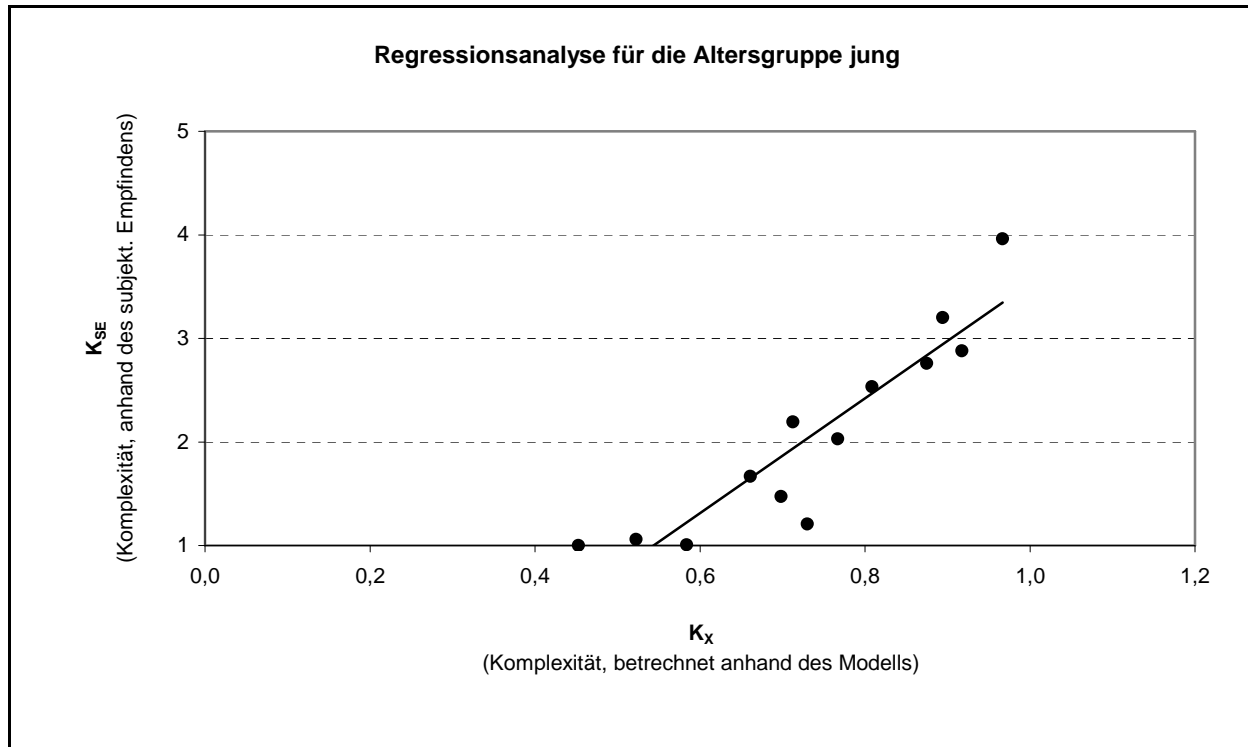


Bild A9.1: Darstellung des Zusammenhangs zwischen K_x und K_{SE} und der Regressionsgeraden der Altersgruppe jung

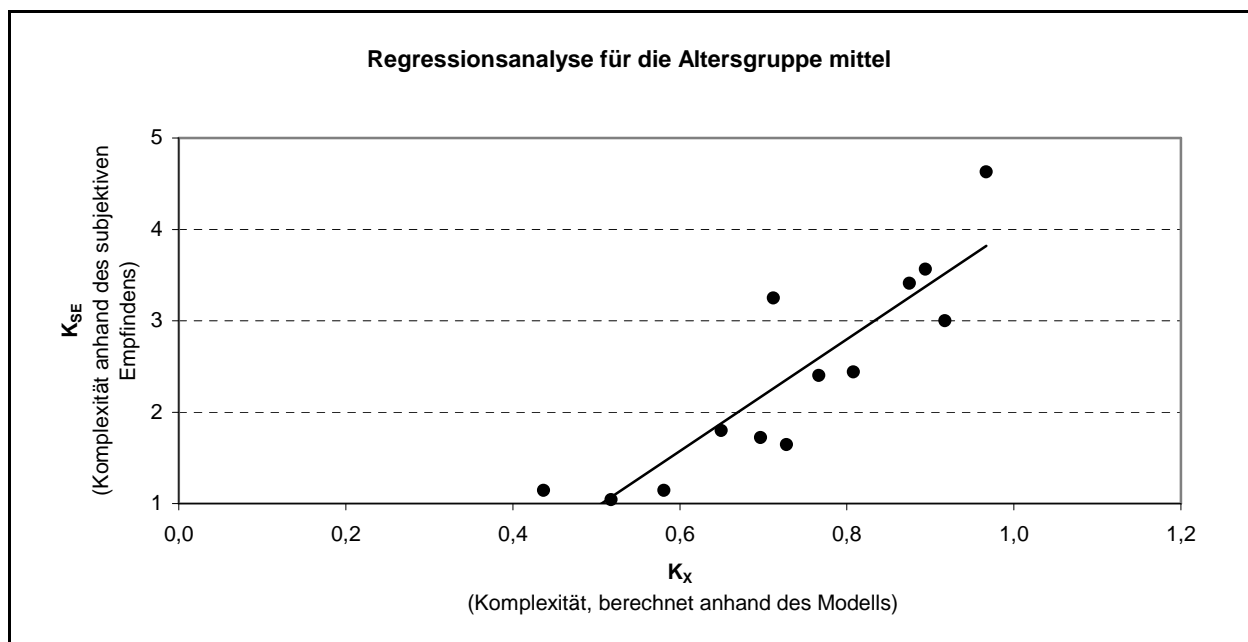


Bild A 9.2: Darstellung des Zusammenhangs zwischen K_x und K_{SE} und der Regressionsgeraden der Altersgruppe mittel

Anhang

A9.2 Ergebnisse der Absicherung der Regressionskoeffizienten

Szenarien	x (K _X)	y (K _{SE})	x*y (K _X *K _{SE})	x ² (K _X ²)	y ² (K _{SE} ²)
1	0,52	1,06	0,547	0,268	1,118
2	0,58	1,01	0,585	0,338	1,015
3	0,44	1,00	0,437	0,191	1,000
4	0,73	1,21	0,880	0,530	1,460
5	0,70	1,47	1,025	0,486	2,165
6	0,77	2,03	1,555	0,587	4,119
7	0,65	1,67	1,083	0,422	2,778
8	0,71	2,19	1,561	0,507	4,806
9	0,97	3,96	3,830	0,935	15,694
10	0,89	3,20	2,862	0,800	10,240
11	0,92	2,88	2,641	0,842	8,285
12	0,87	2,76	2,414	0,766	7,614
13	0,81	2,53	2,048	0,653	6,424
Q _x	$\sum x^2 - 1/n * (\sum x)^2$			0,307	
Q _y	$\sum y^2 - 1/n * (\sum y)^2$			10,778	
Q _{xy}	$\sum x*y - 1/n * \sum x * \sum y$			1,658	
S _{y,x}	$\sqrt{((Q_y - Q_{xy}^2 / Q_x) / (n-2))}$			0,408	
S _b	$s_{y,x} / \sqrt{Q_x}$			0,736	
S _a	$s_b * \sqrt{(\sum x^2 / n)}$			0,552	
t	$ b - \beta / s_{y,x} * \sqrt{Q_x}$			7,328	
t _{Tabelle}	4,437 für df = 11 und p < 0,001				
t > t _{Tabelle}	Bedingung erfüllt!				

Tabelle A9.1: Berechnungen zur Absicherung des Regressionskoeffizienten für das Modell der Altersgruppe jung

Szenarien	x (K _X)	y (K _{SE})	x*y (K _X *K _{SE})	x ² (K _X ²)	y ² (K _{SE} ²)
1	0,52	1,04	0,537	0,266	1,083
2	0,58	1,15	0,664	0,337	1,311
3	0,43	1,15	0,494	0,186	1,311
4	0,73	1,64	1,195	0,529	2,699
5	0,70	1,72	1,200	0,485	2,966
6	0,77	2,40	1,839	0,587	5,760
7	0,65	1,80	1,162	0,417	3,240
8	0,71	3,25	2,314	0,507	10,563
9	0,97	4,63	4,477	0,935	21,441
10	0,89	3,56	3,186	0,800	12,691
11	0,92	3,00	2,753	0,842	9,000
12	0,87	3,41	2,983	0,765	11,622
13	0,81	2,44	1,972	0,653	5,959
Q _x	$\sum x^2 - 1/n * (\sum x)^2$			0,313	
Q _y	$\sum y^2 - 1/n * (\sum y)^2$			14,819	
Q _{xy}	$\sum x*y - 1/n * \sum x * \sum y$			1,895	
S _{y,x}	$\sqrt{((Q_y - Q_{xy}^2 / Q_x) / (n-2))}$			0,550	
S _b	$s_{y,x} / \sqrt{Q_x}$			0,984	
S _a	$s_b * \sqrt{(\sum x^2 / n)}$			0,738	
t	$ b - \beta / s_{y,x} * \sqrt{Q_x}$			6,159	
t _{Tabelle}	4,437 für df = 11 und p < 0,001				
t > t _{Tabelle}	Bedingung erfüllt!				

Tabelle A9.2: Berechnungen zur Absicherung des Regressionskoeffizienten für das Modell der Altersgruppe mittel

Anhang

Szenarien	x (K _x)	y (K _{SE})	x*y (K _x *K _{SE})	x ² (K _x ²)	y ² (K _{SE} ²)
1	0,56	1,97	1,096	0,308	3,895
2	0,59	1,90	1,128	0,352	3,610
3	0,46	2,30	1,053	0,210	5,290
4	0,75	2,92	2,193	0,564	8,533
5	0,75	3,21	2,422	0,568	10,332
6	0,83	3,37	2,788	0,686	11,334
7	0,67	2,85	1,904	0,445	8,139
8	0,74	2,92	2,151	0,544	8,507
9	0,98	3,60	3,543	0,969	12,960
10	0,94	4,19	3,927	0,879	17,535
11	1,03	3,79	3,903	1,063	14,332
12	0,98	3,30	3,230	0,958	10,890
13	0,81	3,28	2,663	0,660	10,744
Q _x	$\sum x^2 - 1/n * (\sum x)^2$			0,377	
Q _y	$\sum y^2 - 1/n * (\sum y)^2$			5,496	
Q _{xy}	$\sum x*y - 1/n * \sum x * \sum y$			1,274	
S _{y,x}	$\sqrt{((Q_y - Q_{xy}^2 / Q_x) / (n-2))}$			0,330	
S _b	$s_{y,x} / \sqrt{Q_x}$			0,537	
S _a	$s_b * \sqrt{(\sum x^2 / n)}$			0,426	
t	$ b - \beta / s_{y,x} * \sqrt{Q_x}$			6,289	
t _{Tabelle}	4,437 für df = 11 und p < 0,001				
t > t _{Tabelle}	Bedingung erfüllt!				

Tabelle A9.3: Berechnungen zur Absicherung des Regressionskoeffizienten für das Modell der Altersgruppe alt

A9.3 Ergebnisse für das Beispielszenario

Modell der Altersgruppe jung						
Objekte	EO	KR	OK	NF	K _X	K _{SE}
Wegweiser	0,0640	1,0	0,0640	0,586	0,643	1,6
Leittafel	0,0652	0,3	0,0196			
Werbelogo	0,0686	0,286	0,0196			

Tabelle A9.4: Bestimmung der Objekteigenschaften EO, der Objektkomplexitäten OK und der Komplexität des Szenarios K_X, Altersgruppe jung

Modell der Altersgruppe mittel						
Objekte	EO	KR	OK	NF	K _X	K _{SE}
Wegweiser	0,0640	1,0	0,0640	0,727	0,540	1,2
Leittafel	0,0652	0,3	0,0196			
Werbelogo	0,0686	0,286	0,0196			

Tabelle A9.5: Bestimmung der Objekteigenschaften EO, der Objektkomplexitäten OK und der Komplexität des Szenarios K_X, Altersgruppe mittel

Anhang

A10 Daten zur Grenzwertermittlung der vorläufigen Checkliste

A10.1 Aufgelistete Objekteigenschaften der 17 Szenarien

Szenario 85					
$K_{SE, alt} = 2,3$					
Rang	Objektbezeichnung	PF _{xy}	GF	AF	EO
1	Shell-Logo	0,652	0,814	0,780	0,072
2	Reflektor 3	0,638	0,579	0,892	0,070
3	Leittafel	0,583	0,810	0,791	0,069
4	Wegweiser Parkplatz	0,617	0,910	0,622	0,068
5	Leitpfosten 1	0,582	0,564	0,852	0,066
6	Leitpfosten 2	0,578	0,505	0,806	0,063

Tabelle A 10.1: Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 85

Szenario 8					
$K_{SE, alt} = 2,4$					
Rang	Objektbezeichnung	PF _{xy}	GF	AF	EO
1	MC Donald - Logo	0,641	0,798	0,865	0,074
2	Erotic - Logo	0,573	0,836	0,863	0,071
3	200m Tafel	0,618	0,786	0,817	0,071
4	100m Tafel	0,599	0,708	0,804	0,068
5	Wegweiser2	0,626	0,845	0,594	0,066
6	Wegweiser1	0,582	0,875	0,578	0,064

Tabelle A 10.2: Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 8

Szenario 79					
$K_{SE, alt} = 2,4$					
Rang	Objektbezeichnung	PF _{xy}	GF	AF	EO
1	Werbelogo rechts	0,763	0,737	0,909	0,080
2	100m Tafel	0,705	0,859	0,851	0,078
3	blendende Lichtquelle	0,659	0,716	0,914	0,075
4	blauer Wegweiser	0,632	0,844	0,725	0,070
5	weißer Wegweiser	0,618	0,828	0,473	0,062

Tabelle A 10.3: Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 79

Szenario 15					
$K_{SE, alt} = 2,5$					
Rang	Objektbezeichnung	PF_{xy}	GF	AF	EO
1	Beleuchtungsgruppe 2	0,842	0,655	0,893	0,082
2	Beleuchtungsgruppe 3	0,770	0,772	0,908	0,081
3	Tankstelle	0,730	0,980	0,819	0,081
4	Beleuchtungsgruppe 1	0,666	0,795	0,914	0,077
5	Wegweiser1	0,618	0,860	0,840	0,073
6	Wegweiser2	0,694	0,813	0,700	0,072
7	Leittafel	0,618	0,815	0,766	0,070

Tabelle A 10.4: Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 15

Szenario 48					
$K_{SE, alt} = 2,5$					
Rang	Objektbezeichnung	PF_{xy}	GF	AF	EO
1	Werbelogo rechts	0,722	0,873	0,940	0,082
2	Werbelogo links	0,656	0,780	0,795	0,072
3	100m Tafel	0,646	0,805	0,775	0,072
4	Wegweiser	0,608	0,892	0,712	0,070
5	Werbelogo extrem links	0,478	0,870	0,918	0,069
6	Pfeilwegweiser	0,599	0,690	0,669	0,064

Tabelle A 10.5: Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 48

Szenario 98					
$K_{SE, alt} = 2,6$					
Rang	Objektbezeichnung	PF_{xy}	GF	AF	EO
1	IKEA-Logo	0,723	0,846	0,803	0,077
2	200m Tafel	0,694	0,836	0,684	0,072
3	Wegweisergruppe vorn	0,615	0,950	0,647	0,069
4	Kilometertafel	0,652	0,834	0,659	0,069
5	100m Tafel	0,638	0,707	0,694	0,067
6	Wegweisergruppe hinten	0,578	0,824	0,523	0,061

Tabelle A 10.6: Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 98

Anhang

Szenario 12					
$K_{SE, alt} = 2,6$					
Rang	Objektbezeichnung	PF_{xy}	GF	AF	EO
1	Gebäude	0,684	0,929	0,912	0,080
2	Werbelogo 2	0,710	0,812	0,835	0,077
3	Werbelogo 1	0,775	0,722	0,762	0,076
4	Geschwindigkeitsbegrenzung	0,628	0,744	0,622	0,065

Tabelle A 10.7: Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 12

Szenario 87					
$K_{SE, alt} = 3,3$					
Rang	Objektbezeichnung	PF_{xy}	GF	AF	EO
1	Arallogo rechts	0,836	0,938	0,873	0,087
2	Tankstelle	0,804	1,033	0,864	0,087
3	Leittafel	0,760	0,924	0,633	0,075
4	Arallogo links	0,652	0,667	0,709	0,067
5	Wegweiser	0,576	0,970	0,467	0,062

Tabelle A 10.8: Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 87

Szenario 58					
$K_{SE, alt} = 3,6$					
Rang	Objektbezeichnung	PF_{xy}	GF	AF	EO
1	IBIS-Logo	0,760	0,809	0,870	0,080
2	Tankstelle	0,674	0,885	0,899	0,078
3	Preisanzeige	0,695	0,838	0,783	0,075
4	"Baum"	0,649	0,778	0,682	0,068
5	Wegweiser vorn	0,632	0,993	0,543	0,068
6	Wegweiser hinten	0,591	0,861	0,383	0,058

Tabelle A 10.9: Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 58

Szenario 54					
$K_{SE, alt} = 3,4$					
Rang	Objektbezeichnung	PF _{xy}	GF	AF	EO
1	Wegweiser rechts	0,892	1,033	0,416	0,078
2	Tankstelle links	0,644	1,033	0,802	0,077
3	Preisanzeige	0,646	0,793	0,896	0,075
4	Werbung oben	0,621	0,695	0,972	0,074
5	Wegweiser hinten	0,665	0,964	0,676	0,073
6	Werbung rechts	0,683	0,785	0,759	0,073
7	Wegweiser links	0,824	1,033	0,350	0,072
8	Leuchtreklame "Baum"	0,722	0,778	0,694	0,072
9	Wegweiser links(m)	0,762	1,033	0,373	0,070
10	Wegweiser rechts(m)	0,704	1,033	0,368	0,067
11	Wegweiser ganz hinten	0,646	0,833	0,498	0,064

Tabelle A 10.10: Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 54

Szenario 17					
$K_{SE, alt} = 3,6$					
Rang	Objektbezeichnung	PF _{xy}	GF	AF	EO
1	Werbelogo rechts	0,762	0,774	0,883	0,080
2	Höffner-Gebäude	0,740	1,010	0,736	0,079
3	Wegweiser 3	0,733	0,941	0,717	0,077
4	Bake	0,708	0,876	0,742	0,075
5	Wegweiser 2	0,618	0,865	0,801	0,072
6	Werbelogo links	0,700	0,823	0,671	0,072
7	Pfeilwegweiser	0,763	0,939	0,383	0,068
8	Wegweiser 1	0,576	0,862	0,574	0,063

Tabelle A 10.11: Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 17

Anhang

Szenario 16					
$K_{SE, alt} = 3,6$					
Rang	Objektbezeichnung	PF_{xy}	GF	AF	EO
1	Hotelwerbung	0,779	0,856	0,997	0,086
2	beleuchtete Fenster	0,786	0,987	0,884	0,086
3	Wegweiser 3	0,745	1,000	0,721	0,080
4	Beleuchtungsgruppe	0,709	0,935	0,841	0,079
5	Wegweiser 4	0,699	1,000	0,400	0,067
6	Wegweiser 2	0,683	1,000	0,391	0,066
7	Wegweiser 1	0,641	1,000	0,420	0,065

Tabelle A 10.12: Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 16

Szenario 71					
$K_{SE, alt} = 3,8$					
Rang	Objektbezeichnung	PF_{xy}	GF	AF	EO
1	Beleuchtungspunkt 1	0,879	0,891	0,855	0,087
2	Tankstellenkomplex	0,679	1,000	0,816	0,079
3	Esso-Logo	0,685	0,870	0,913	0,079
4	Beleuchtungspunkt 2	0,674	0,891	0,885	0,078
5	Beleuchtungsgruppe 1	0,689	0,937	0,821	0,078
6	Beleuchtungsgruppe 2	0,675	0,859	0,872	0,077
7	Esso-Preistafel	0,634	0,802	0,914	0,075
8	Wegweiser links	0,625	0,974	0,709	0,072
9	Wegweiser rechts	0,666	0,875	0,667	0,071
10	Wegweiser Mitte	0,635	0,928	0,624	0,069
11	Geschwindigkeitsbegrenzung	0,604	0,663	0,611	0,062

Tabelle A 10.13: Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 71

Szenario 92					
$K_{SE, alt} = 3,8$					
Rang	Objektbezeichnung	PF _{xy}	GF	AF	EO
1	i-Logo	0,859	0,883	0,915	0,088
2	Esso Preisanzeige	0,764	1,000	0,856	0,084
3	ADAC-Logo 1	0,820	0,885	0,773	0,082
4	Leuchtreklame weiss	0,700	0,922	0,906	0,081
5	IBIS Schriftzug	0,742	0,812	0,878	0,080
6	Leuchtreklame rot	0,712	0,915	0,824	0,079
7	ADAC-Dach 2	0,690	0,852	0,884	0,078
8	ADAC-Dach 1	0,717	0,770	0,885	0,078
9	ADAC-Logo 2	0,743	0,821	0,756	0,076
10	IBIS-Logo	0,734	0,747	0,813	0,076
11	Tankstellendach 1	0,644	0,936	0,815	0,075
12	Zapfsäulen	0,619	0,892	0,884	0,075
13	Beleuchtungspunkt2	0,724	0,590	0,876	0,074
14	Beleuchtungspunkt3	0,654	0,607	0,935	0,073
15	Tankstellendach 1 (Shop)	0,653	0,820	0,773	0,072
16	beleuchtete Fenster 3	0,704	0,780	0,643	0,070
17	Beleuchtungsgruppe2	0,553	0,938	0,791	0,070
18	beleuchtete Fenster 4	0,714	0,703	0,654	0,069
19	beleuchtete Fenster 2	0,670	0,757	0,669	0,069
20	beleuchtete Fenster 5	0,728	0,579	0,648	0,067
21	Beleuchtungsgruppe1	0,544	0,930	0,693	0,067
22	beleuchtete Fenster 7	0,711	0,593	0,600	0,065
23	Leuchtreklame 9 (Licht)	0,545	0,599	0,869	0,065
24	beleuchtete Fenster 6	0,674	0,579	0,654	0,065
25	Leuchtreklame 10 (Dachspitze)	0,606	0,733	0,644	0,064
26	Esso-Logo	0,447	0,730	0,907	0,064
27	beleuchtete Fenster 1	0,663	0,743	0,486	0,063
28	Leuchtreklame 7 (Licht)	0,473	0,677	0,832	0,062
29	Leuchtreklame 8 (Licht)	0,486	0,572	0,876	0,062
30	Beleuchtungsgruppe 3	0,394	0,702	0,791	0,057
31	Wegweiser	0,536	0,967	0,378	0,057
32	Beleuchtungsgruppe 4	0,458	0,762	0,589	0,056

Tabelle A 10.14: Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 92

Anhang

Szenario 11					
$K_{SE, alt} = 3,9$					
Rang	Objektbezeichnung	PF_{xy}	GF	AF	EO
1	blaues Werbelicht	0,774	0,685	1,000	0,082
2	Esso Preisanzeige links	0,717	0,917	0,860	0,080
3	Tankstellenkomplex rechts	0,666	0,953	0,816	0,077
4	Leittafel gerade	0,690	0,797	0,782	0,074
5	Leittafel rechts	0,697	0,761	0,709	0,071
6	Wegweiser links	0,633	1,000	0,546	0,068
7	Leuchtreklame "Baum"	0,675	0,739	0,640	0,068
8	Wegweiser Mitte	0,632	0,957	0,546	0,067
9	Wegweiser rechts	0,675	0,957	0,462	0,067
10	Wegweisergruppe hinten	0,614	0,896	0,420	0,061

Tabelle A 10.15: Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 11

Szenario 44					
$K_{SE, alt} = 4,3$					
Rang	Objektbezeichnung	PF_{xy}	GF	AF	EO
1	blaue Werbetafel 1	0,871	0,952	0,877	0,089
2	Beleuchtungspunkt 1	0,928	0,749	0,915	0,089
3	weiße Werbetafel 1	0,804	0,991	0,915	0,087
4	Beleuchtungspunkt 2	0,896	0,771	0,885	0,087
5	ING-Schriftzug	0,884	0,741	0,865	0,085
6	blaue Werbetafel 2	0,800	0,830	0,869	0,083
7	Beleuchtungsgruppe 1	0,785	0,784	0,913	0,082
8	weiße Werbetafel 2	0,759	0,808	0,911	0,081
9	Beleuchtungspunkt 3	0,752	0,794	0,885	0,080
10	Beleuchtungspunkt 4	0,721	0,864	0,872	0,079
11	weißer Wegweiser	0,780	0,950	0,557	0,075
12	blauer Wegweiser	0,851	1,033	0,362	0,074
13	Beleuchtungsgruppe 2	0,565	0,838	0,887	0,072
14	Halteverbotsschild	0,740	0,884	0,459	0,068

Tabelle A 10.16: Auflistung der Objekteigenschaften für alle statischen Objekte, Szenario 44

A10.2 Beispielszenarien

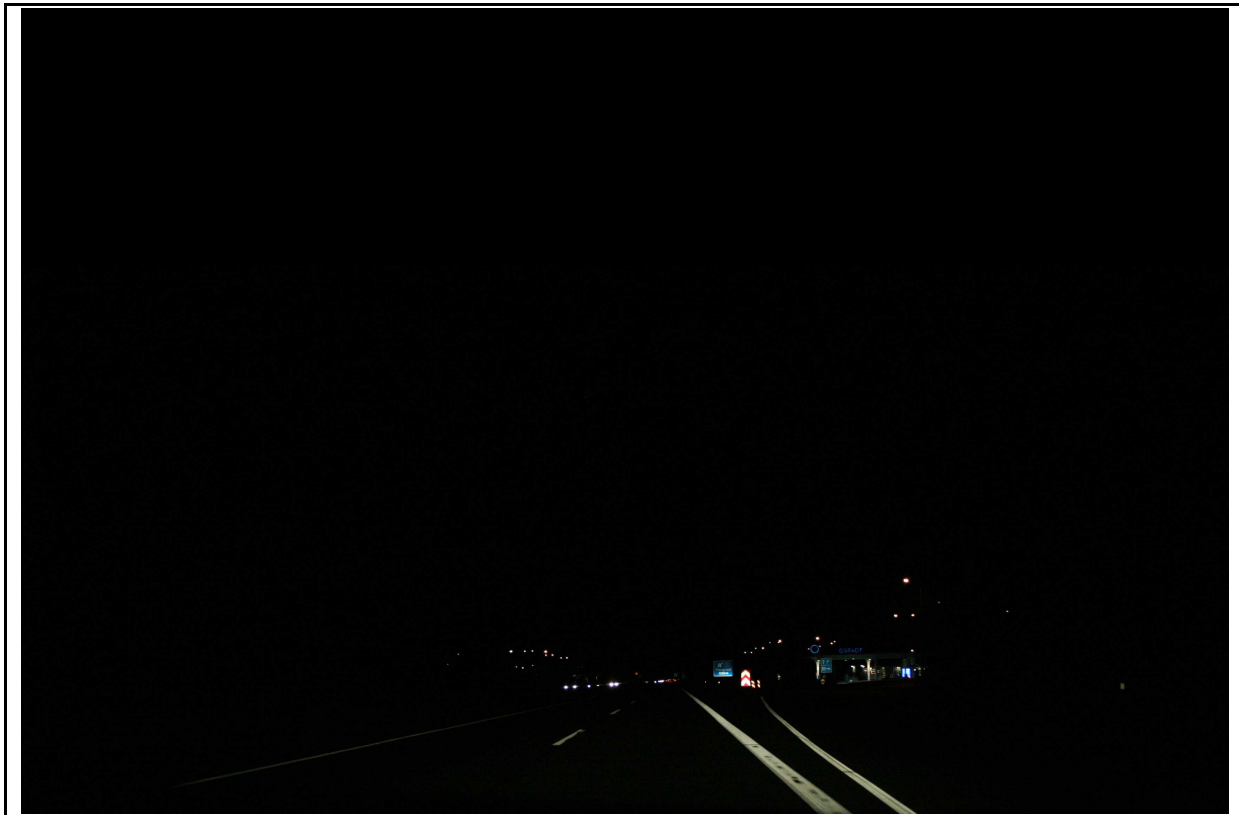


Bild A10.1: Szenario 15

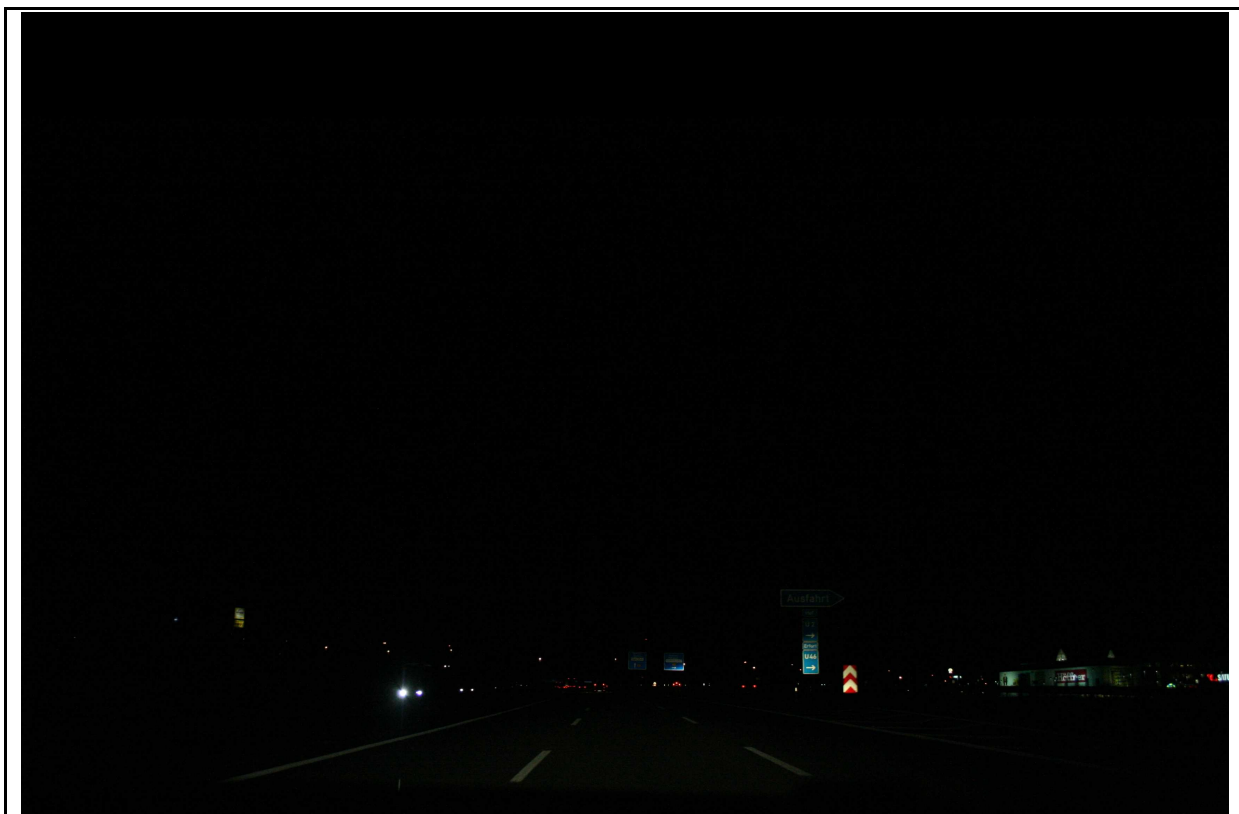


Bild A10.2: Szenario 17

Anhang



Bild A10.3: **Szenario 71**



Bild A10.4: Szenario 79



Bild A10.5: Szenario 87

Anhang

A10.3 Berechnete Differenzbeträge b_{EO} der betreffenden Szenarien

Szenario	Komplexitätsbereich _i	Anzahl der Objekte	b_{EO} zwischen 1. und n. (max. 7.) Rang
85	I	6	0,009
79	I	5	0,019
8	I	6	0,010
48	I	6	0,018
15	I	7	0,012
12	II	4	0,015
98	II	6	0,016
87	II	5	0,025
54	II	15	0,011
58	III	6	0,022
16	III	7	0,021
17	III	8	0,012
80	III	11	0,005
71	III	11	0,012
92	III	32	0,010
11	III	10	0,015
44	III	14	0,007

Tabelle A10.17: Differenzbeträge für alle 17 Szenarien, geordnet nach Komplexitätsbereich

Szenario	Komplexitätsbereich _i	Anzahl der Objekte	b_{EO}
79	I	5	0,019
87	II	5	0,025
85	I	6	0,009
8	I	6	0,010
48	I	6	0,018
98	II	6	0,016
58	III	6	0,022
15	I	7	0,012
16	III	7	0,021

Tabelle A10.18: Differenzbeträge der Szenarien mit weniger als acht Objekten